

Documentación geométrica y difusión digital de
elementos arquitectónicos patrimoniales:
Capiteles del Real Alcázar de Sevilla

Borja Molero Alonso

27 de mayo de 2017

“La representación de la arquitectura del pasado con fines de preservación y estudio plantea problemas específicos, pues el conocimiento de las formas reales resulta indispensable tanto para el análisis de las necesidades de su conservación, como para un correcto estudio histórico y formal, ya que en ambos casos hay que separar la realidad física de la mera interpretación.”

Antonio Almagro, *Publicaciones del Ministerio de Cultura*, 2011

Agradecimientos

Este trabajo ha podido realizarse gracias a los recursos proporcionados por el Vicerrectorado de Investigación y el Departamento de Ingeniería Gráfica de la Universidad de Sevilla.

Agradezco a mi Director de tesis doctoral, Director de Formación Académica, compañero en multitud de levantamientos y amigo Dr. José Antonio Barrera Vera, por su apoyo e incommensurable ayuda durante los años que llevo trabajando a su lado.

A Dr. Salvatore Barba, al Laboratorio Modelli, al Dipartimento di Ingegneria Civile y la Università degli Studi di Salerno por la enorme ayuda y apoyo mostrado.

Agradezco a Dr. Chris Gaffney, Dr. Andy Holland, Dr. Thomas Sparrow, Dra. Emma Brown y Dra. Sonia O'Connor, todos ellos del Division of Archaeological, Geographical and Environmental Sciences de la Universidad de Bradford, por la ayuda prestada y ser unos increíbles anfitriones durante los meses que esta investigación se desarrolló en su universidad.

A Dr. Antonio Álvaro Tordesillas y su equipo de la Universidad de Valladolid, por acogerme con afecto desde el primer día en su entorno laboral, y también personal.

A Dr. Francisco Ferraris, y la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina) por su apoyo.

A mis compañeros y amigos del Departamento de Ingeniería Gráfica, por estar siempre cerca para esos valiosos consejos.

Finalmente, agradezco inmensamente el apoyo incondicional y ánimo recibido por mis amigos, mi familia y Sara.

A todos, mil gracias.

Resumen

Los avances recientes en el campo de la documentación del patrimonio arqueológico utilizando la fotogrametría digital y escáneres han conducido a un renovado interés por las técnicas y procesos que se utilizan para obtener modelos geométricos del patrimonio. Sin embargo, hasta ahora ha existido poco debate sobre la definición de procesos estandarizados que aseguren la homogeneidad y la interoperabilidad de los modelos geométricos.

Por otro lado, los capiteles contienen gran información histórica del edificio. Nuestra investigación pretende, mediante el empleo y la comparación de las nuevas tecnologías en la documentación gráfica, obtener un protocolo de actuación en la documentación de este tipo de elementos arquitectónicos. Para ello se han empleado técnicas fotogramétricas y escáner óptico para la obtención de los datos de campo, software especializado de manejo de nubes de puntos y modelado en la elaboración de los modelos 3D texturizados y visores web, SIG y RA para la disseminación de los resultados.

Palabras Clave

Digitalización geométrica 3D, capiteles, escáner óptico, fotogrametría de objeto cercano, difusión digital.

Abstract

Recent developments in the field of cultural heritage documentation using digital photogrammetry and scanning have led to a renewed interest in techniques and processes that are being used to get geometric models of heritage. However, there hasn't been enough discussion about the definition of standardized processes in order to ensure homogeneity and interoperability.

On the other hand, very valuable information of the buildings is contained by capitals. The aim of our research is to get a protocol in the documentation of this kind of architectural elements, through the use and comparison of new technologies in graphic documentation. We have used photogrammetric techniques and optical scanners in order to obtain field data, specialized point clouds software for the development of textured 3D models and web viewers, GIS and AR software that allows us to disseminate the results.

Keywords

3D geometric digitalization, capital, optical scanner, close-range fotogrammetry, digital dissemination.

Índice general

Vº.Bº. del Tutor	I
Agradecimientos	III
Resumen	IV
Abstract	IV
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	XI
1. Introducción y descripción del problema	1
1.1. Introducción	1
1.2. Crisis de paradigmas	2
1.3. Planteamiento del problema	3
1.4. Justificación de la investigación	7
1.5. Definición de marco y límites	10
2. Objetivos	13
3. Metodología	16
4. Estado científico-técnico	20
4.1. Síntesis sobre la protección del patrimonio en las cartas internacionales	21
4.2. Tecnologías para la adquisición de datos digitales en el ámbito patrimonial	22
4.3. Metodologías para la captura de datos 3D en el ámbito patrimonial	25
4.4. Ejemplo de aplicación SIG al ámbito patrimonial	32
4.5. Epistemología y proyectos específicos de referencia	34
4.6. Conclusiones parciales del Estado de la Cuestión	35
I Digitalización 3D	38
5. Estudios Previos	40
5.1. Líneas seguidas	40
5.2. Primeros levantamientos	61
5.3. Comparación de métodos	80
5.4. Primeros resultados gráficos	81

6. Levantamiento de los capiteles del Patio de las Muñecas	90
6.1. Introducción	90
6.2. Trabajos de levantamiento	91
6.3. Resultados gráficos	108
 II Sistema de Información	 114
7. Desarrollo de Sistema de Información Geográfica	116
7.1. Introducción	116
7.2. Desarrollo de Base de Datos Espacial con PostgreSQL y PostGIS	118
7.3. Creación de geometrías con QGIS	126
7.4. Visor de mapas web con CartoDB	127
 III Difusión	 128
8. Publicación online de resultados	130
8.1. Del modelo tridimensional	130
8.2. Del sistema de información geográfica	133
8.3. App Realidad Aumentada	135
 9. Conclusiones finales de la investigación	 138
9.1. Objetivos	138
9.2. Preguntas de la investigación	141
9.3. Conclusiones generales de síntesis	142
9.4. Futuras líneas de investigación	143
 10. Anexos	 145
10.1. Desarrollo SIG	145

Índice de figuras

1.1. Documentación gráfica aportada al estudio científico de capiteles	4
1.2. Arriba: imágenes del mosaico desde sus dos caras o puntos de vista antes de ser destruido. Abajo: instantánea de la zona destruida, con la consecuente desaparición del mosaico	6
3.1. Árbol metodológico de la investigación	18
4.1. Aproximación a la orto-fotografía: funeraria etrusca (s. IV-III a.C.)	24
4.2. Metodología de levantamiento. Trabajos de campo, de gabinete y resultados	26
4.3. Esquema sobre las metodologías de adquisición 3D más usuales en la digitalización del patrimonio	27
4.4. Sección de hipogea a partir de datos TLS	32
4.5. Distribución georreferenciada de tumbas en SICAC	33
4.6. Cálculo de rutas óptimas y de mínimo coste basadas en la pendiente con apoyo de SIG	34
5.1. Anotaciones durante la fase de estudios previos sobre plano de fachada del Cenador de Carlos V, Real Alcázar de Sevilla	41
5.2. Anotaciones durante la fase de estudios previos del capitel seleccionado del Cenador de Carlos V, Real Alcázar de Sevilla	43
5.3. Dos imágenes de la misma nube de puntos desde distintos ángulos, pertenecientes a un capitel de la ciudad de Bradford (UK): A) No se observan las zonas de sombras; B) Se observan los problemas derivados de las zonas de sombra arrojadas por los adornos propios del capitel.	46
5.4. Orto-alzado oeste del conjunto dolménico El Pozuelo (Huelva). Nube de puntos obtenida con Leica ScanStation C10 (TOF) . . .	48

5.5. Nube de puntos obtenida con Leica ScanStation C10 (TOF). Conjunto dolménico El Pozuelo (Huelva)	49
5.6. Faro Laser Scanner Photon 120/20 y cámara Nikon D300 en posición de escaneo	51
5.7. Deformación de la línea láser del Faro Arm Quantum sobre el objeto arqueológico	52
5.8. A) Faro Arm Quantum; B) Dispositivos de ayuda a la calibración; C) Proceso de escaneo de pequeña pieza arqueológica; D) Distancia de escaneo	54
5.9. Dispositivo para la realización de las tomas fotográficas en la fase de texturizado	55
5.10. Nube de puntos con información RGB obtenida con Artec MHT 3D. Yasería de la fachada norte del Cenador de Carlos V, Real Alcázar de Sevilla	56
5.11. Ortoproyección del modelo 3D de la yasería de la fachada norte del Cenador de Carlos V del Real Alcázar de Sevilla obtenida a partir de técnicas fotogramétricas	58
5.12. Yasería de la fachada norte del Cenador de Carlos V, Real Alcázar de Sevilla. A) Nube de puntos; B) Triangulación para la obtención de superficies; C) Superficies texturizadas	60
5.13. Capitel seleccionado para la puesta en práctica de la investigación. Exposición suroeste	62
5.14. Documentación gráfica del Cenador de Carlos V con selección del capitel objeto de estudio	63
5.15. Profundidad de color (de izquierda a derecha): 24 BPP, 16 BPP y 8 BPP	63
5.16. Toma de datos con el escáner Artec MHT y equipo informático portátil	64
5.17. Medidor de rango utilizado con ayuda del software Artec Studio v8	65
5.18. Proceso gráfico del levantamiento: A) Ruido producido durante uno de los escaneos; B) Nube de puntos obtenida; C) Proceso TIN; D) Resultado de la alineación de los distintos escaneos	68
5.19. Trabajos sobre el modelo final: A y B) Planos de sección al cuerpo del capitel; C) Modelo 3D texturizado	69
5.20. Vista en planta de la disposición de las cámaras entorno al capitel (primer nivel)	71
5.21. Gráficas de la evolución de las distorsiones radial y tangencial para nuestros parámetros fotográficos	74

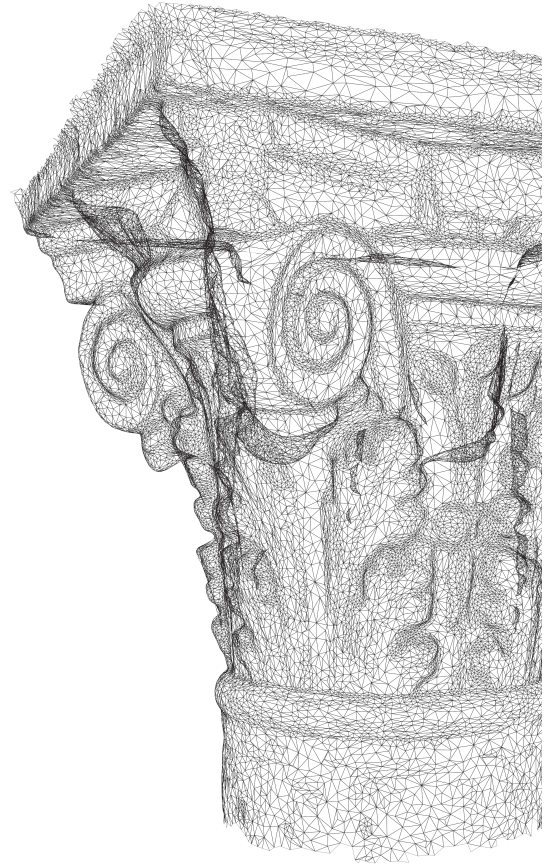
5.22. Elaboración de máscaras (<i>masks</i>) previo al proceso de alineamiento de cámaras. A la izquierda, fotografía del elemento a levantar con la inclusión de la máscara. Derecha, raster resultante de la zona de interés seleccionada	76
5.23. Captura de imágenes durante el proceso de levantamiento. De izquierda a derecha: nube puntos creada (también <i>markers</i> y medidas de control); TIN; superficies previas a al proceso de texturizado	77
5.24. Análisis geométrico comparativo tridimensional de dos capiteles de similar geometría. Mapa de desviaciones (3DReshaper)	80
5.25. Secciones realizadas al modelo fotogramétrico y escaneado a la misma cota	83
5.26. Secciones realizadas al tronco del modelo de escaneado cada 50 mm	84
5.27. Orto-proyecciones del modelo 3D fotogramétrico. Este y norte . .	85
5.28. Orto-proyecciones del modelo 3D fotogramétrico. Oeste y sur . .	86
5.29. Detalle del modelo 3D fotogramétrico	87
5.30. Modelo 3D fotogramétrico creado	88
6.1. Comparación de capiteles 1	91
6.2. Comparación de capiteles 2	92
6.3. Comparación de capiteles 3	92
6.4. Croquis del Patio de las Muñecas	93
6.5. Capitel P04 del Patio de las Muñecas	95
6.6. Secuencia para la captura de imágenes	96
6.7. Historiograma de comparación entre modelos a partir de imágenes con y sin flash	97
6.8. Croquis en planta del Patio de las Muñecas con posicionamiento de Estación Total TS02	98
6.9. Diana natural escogida en capitel 1(P01)	98
6.10. Fotografía y visual de punto de control con Estacion Total TS02	99
6.11. Exportación de coordenadas desde Estación Total TS02	100
6.12. Proceso de creación de <i>Mask</i>	101
6.13. Vista en planta de la orientación de cada una de las fotografías en capitel P01	102

6.14. Primera nube de puntos (dispersos) que definen la geometría del capitel P01	103
6.15. Localización de punto de control (<i>Marker</i>	104
6.16. Nube densa de puntos que definen la geometría del capitel P01	105
6.17. TIN generada para el capitel P01	106
6.18. Detalle de la TIN generada para el capitel P01	107
6.19. Imagen de todos los modelos en sistema de referencia local	108
7.1. Sistema de información propuesto para la gestión de diverso tipo de información: bibliográfica, geográfica y geométrica	117
7.2. SIG como fundamento metodológico	118
7.3. Esquema de la arquitectura cliente-servidor en una base de datos	119
7.4. Interfaz gráfica para la gestión de bases de datos PostgreSQL/-PostGIS a través de pgAdminIII	121
7.5. Modelo conceptual de la base de datos desarrollada	122
7.6. Interfaz gráfica del software de escritorio QGIS con visionado de la conexión a la base de datos	126
8.1. Imagen del visor de modelo 3D generado	133
8.2. UI de la plataforma CartoDB mostrando la base de datos GeoJSON importada desde PostGIS	134
8.3. Imagen del visor SIG generado	134
8.4. App de Realidad Aumentada del capitel digitalizado en la plataforma Play Store	137
9.1. Diagrama de alimentación de objetivos	140

Índice de tablas

5.1. Instrumentos empleados durante la investigación	44
5.2. Software empleado investigación	44
5.3. Equipos auxiliares más relevantes empleados en la investigación .	44
5.4. Configuración de los parámetros del equipo fotográfico	72
5.5. Coeficientes de distorsión radial y tangencial específicos de los parámetros configurados en el equipo fotográfico	74

Introducción y descripción del problema



Capítulo 1

Introducción y descripción del problema

1.1. Introducción

La forma de representar gráficamente nuestro patrimonio ha evolucionado de la mano del avance vertiginoso de las tecnologías de captación y representación. Nuestra labor de investigación comenzó con el establecimiento de numerosas preguntas: ¿técnicas, tecnologías, recursos, metas? Empezamos a definir fronteras, marcar caminos y dar los primeros pasos hacia objetivos simples. Hoy lo tenemos claro, no existe un final, solo paradas que nos permiten echar la vista atrás para mirar, analizar, y seguir. Todavía, debido a los continuos avances tecnológicos, seguimos discutiendo sobre las tecnologías o software que conviene emplear o, al menos, analizar y probar.

La evolución de la tecnología es flagrante, incluso en el periodo de tiempo en el que se redacta el presente proyecto. Detalles o pequeñas mejoras que nos gustaría haber resaltado, poco tiempo después hemos retrocedido, porque ya ha aparecido la alternativa que soluciona la debilidad. Sin embargo, nuestra tarea, encaminada a intentar marcar un inicio de estandarización, e incluso primeros pasos de difusión, mediante la exposición de protocolos e ideas, nos parece cada día más importante. Y no somos los únicos que hablamos de estandarización en una disciplina tan extendida.

Una de las finalidades más importantes de lo propuesto en la presente investigación está estrechamente relacionada con un breve avance en estandariza-

ción de nuestra disciplina, levantamientos 3D aplicados al ámbito arqueológico-arquitectónico, que como toda ciencia necesita el apoyo de un método. En dicho método dejamos de forma clara y detallada cómo se ha trabajado, con qué y desde dónde, para que en el futuro nosotros mismos u otros compañeros puedan poner en tela de juicio nuestras actuaciones aportando nueva información que contribuya al avance en el camino que aquí intentamos iniciar.

A lo largo de estos años de trabajo no solo hemos realizado los métodos y levantamientos aquí presentados. Hemos trabajado con distintos sistemas de digitalización 3D, profundizado en el conocimiento de distintas tecnologías, levantado infinidad de elementos tanto del ámbito arquitectónico, arqueológico y escultórico que, aunque no tienen reflejo pormenorizado en la presente redacción, han contribuido de forma importante para elaborar este proyecto. Son la base de lo que aquí hoy se presenta. En el camino quedan puertas abiertas a senderos que salen de nuestras fronteras, levantamientos que aportan información en la sombra, aplicaciones que han dado lugar a publicaciones, ideas que se han convertido en patentes y, sobre todo, relaciones con personas interesadas en destinos parecidos que serán para toda la vida.

1.2. Crisis de paradigmas

Pero, ¿por qué hemos realizado este trabajo de investigación? ¿Es realmente necesario este trabajo? Previa a la realización de este trabajo ha existido una fase de puesta en duda de nuestra realidad [1]. En concreto de la realidad que rodea a los ámbitos de¹:

- La digitalización 3D del patrimonio arqueológico.
- La forma en que este patrimonio es documentado.
- Vinculación de los Sistemas de Información Geográfica a la digitalización 3D.

Queremos cuestionar nuestras técnicas actuales, proponer nuevos problemas e intentar crear nuevas soluciones que mejoren los resultados, los flujos de trabajos, los presupuestos, los análisis de los resultados, etc... Nuestro resultado será verificado por la detallada metodología descrita, asignando así el grado de rigurosidad necesario a nuestras investigaciones.

¹El autor Mario Bunge, en su obra Teoría y Realidad [1], transmite la idea de cómo la realidad en sí misma es inabarcable, por ello trabajamos con modelos de la realidad adaptados a nuestro entorno que asumimos como válidos.

Mediante el análisis del estado del arte, realizado no solo a través de la epistemología científica sino también mediante estancias en distintos centros de investigación nacionales y extranjeros, hemos podido comprobar que se siguen empleando metodologías tecnológicamente obsoletas en la documentación geométrica del patrimonio. Si bien es cierto que las técnicas fotogramétricas y de escaneado están totalmente implantadas en el sector arquitectónico [2], [3], actualmente se están abriendo paso dentro del patrimonio arqueológico [4]–[6].

Por ello desde este trabajo, y como primer paso, intentamos poner en crisis las técnicas más tradicionales de documentación geométrica del patrimonio arqueológico en aras de la mejora en cuanto a:

- Toma de datos.
- Métodos de trabajo.
- Objetividad de estos resultados.
- Nuevas posibilidades de difusión de los resultados.

Y, en cuanto a los Sistemas de Información Geográfica:

- Nos cuestionamos las nuevas posibilidades de implementación para añadir el valor geográfico a nuestros modelos y su ayuda a la documentación y difusión.

1.3. Planteamiento del problema

La definición del problema que ha motivado la investigación se desarrolla en dos etapas bien diferenciadas:

1. Elaboración de documentación gráfica 2D y 3D para fines científicos.
2. Catalogación y difusión gráfica 3D de patrimonio cultural y arquitectónico.

Elaboración de documentación gráfica 2D y 3D para fines científicos:

En las siguientes líneas esbozaremos cada una ellas. La primera, surgió de la necesidad de generar documentación gráfica que modelara la realidad aplicada a los capiteles tras la lectura de numerosos textos que describen sus geometrías. Por supuesto, no se trataba de ningún problema en la redacción del texto. El reto surgió derivado de nuestro interés por las nuevas técnicas de documentación gráfica y la extensa literatura necesaria para la definición de las características geométricas. A continuación, exponemos algunos fragmentos de los textos que describen la geometría de los capiteles, extraídos de la revista científica *Rómula*²:

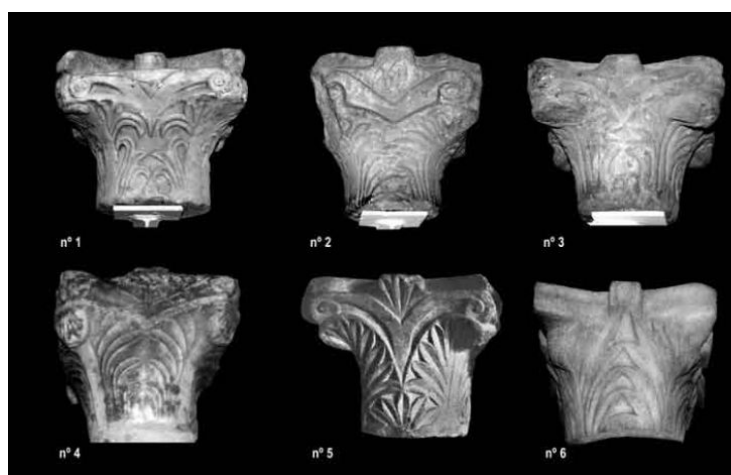


Figura 1.1: Documentación gráfica aportada al estudio científico de capiteles. Fuente: Bermúdez Cano, 2007.

Tienen un tallo central ancho y liso y cuatro grupos de tres foliolos alargados y de ápices apuntados. Los grupos de foliolos están separados por amplios ojales ovalados. Los ápices del grupo inferior se enlazan formando motivos triangulares. Los lóbulos somitales y los limbos están remarcados por una moldura lineal unida en forma de V en el eje del cálato. En la zona inferior las hojas están unidas por una pequeña moldura, que no llega a ser un collarino propiamente dicho. El canal de las volutas es ancho y plano, unido en forma de V en el eje del capitel, desarrollándose hacia los brazos del ábaco donde presenta pequeñas volutas espirales. En el espacio interior del motivo central se dispone un elemento lanceolado que surge del canal derecho.

Pero la característica fundamental [...] es su tendencia hacia formas cilíndricas en el cálato, y el reducido formato de las piezas (entre 20 y 24 cm.).

²La revista ROMVLA es una publicación periódica de carácter anual dedicada fundamentalmente a la publicación de trabajos científicos en el campo de la arqueología en su sentido más amplio, por lo que se han publicado artículos tanto referidos a las diversas divisiones de la disciplina (Arqueología Clásica, Arqueología Medieval) como las que se ocupan de aspectos metodológicos y de la gestión del patrimonio arqueológico. Igualmente actúa como órgano de difusión científica del Seminario de Arqueología de la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla, lo que incluye la difusión de los resultados de los diferentes Proyectos de Investigación que se desarrollan en el mismo [57].

[...]

Dispone de dos rangos de hojas, caulículos completos, volutas y hélices lineales y motivo central de evocación clásica. El ábaco es de brazos curvos bien articulados, con el frente normalmente moldurado. El labio del cálato se reduce a una pequeña moldura interrumpida por las cintas de las volutas angulares. No obstante, existen pequeñas anomalías en la interpretación clásica del orden: el pedúnculo se esquematiza o desaparece, la espata se simplifica, el ábaco presenta una altura superior a la de los ejemplares clásicos y el florón central suele sustituirse por motivos vegetales alejados del repertorio clásico.

[...]

En estos capiteles, la talla presenta un escaso modelado, y en su superficie son perfectamente reconocibles puntos aislados de trépano. Por el contrario, la talla del ejemplar nº 1 transluce cierto grado de modelado, y una mayor plasticidad. Ello, unido al mayor desarrollo de los foliolos y a la estilización de las hojas, provoca la aparición de ahuecamientos triangulares, que disuelven las huellas de la herramienta de rotación. Además en este ejemplar se sustituye el motivo de florón, por un motivo vegetal muy característico, compuesto por palmetas enfrentadas que encierran una especie de fruto estilizado [7].

Tras una revisión bibliográfica podemos comprobar que este tipo de descripciones textuales, acompañadas de imágenes en el mejor de los casos, no es algo esporádico en textos científicos elaborados por expertos arqueólogos: [8]–[11]. De este modo, el primer problema que nos planteamos fue la mejora de la documentación gráfica para ponerla a disposición de los científicos del ámbito del patrimonio, ya fuera arqueológico o arquitectónico [66].

Catalogación y difusión gráfica 3D de patrimonio cultural y arquitectónico:

Un segundo planteamiento viene derivado de la necesidad de preservación de nuestro patrimonio cultural. Son constantes las noticias que nos llegan sobre la destrucción de piezas patrimoniales de valor incalculable, ya sea por motivos humanos o naturales. Acontecimientos que han terminado con “piezas datadas del siglo IX a.C., algunos de los bienes más preciados de la cultura islámica y cristiana”³.

No es necesario analizar conflictos geopolíticos lejos de nuestras fronteras para encontrarnos este tipo de acontecimientos. Como ejemplo de acontecimiento reciente, y cercano, podemos referirnos a la destrucción vandálica producida en Écija ocurrida en la madrugada del 9 al 10 de marzo de 2015, la cual ha terminado con el “mosaico de dos caras” del siglo II d.C. Este mosaico evidenciaba la grandiosidad que alcanzó la antigua Astigi en época romana. Era uno de los

³Palabras de Irina Bokova, directora general de la UNESCO, en su conferencia de prensa del día 27 de febrero de 2015.



Figura 1.2: Arriba: imágenes del mosaico desde sus dos caras o puntos de vista antes de ser destruido. Abajo: instantánea de la zona destruida, con la consecuente desaparición del mosaico. Fuente: Museo Arqueológico de Écija, 2015.

cuatro mosaicos que se han descubierto en el mundo que juega con el espectador dependiendo desde donde se mire: de un lado se veía la cara de un niño, y del otro aparecía el rostro de un anciano. Ahora solo quedan tres. Según Sergio García⁴:

El mosaico que se ha destruido es una pieza que ha sido reconocida internacionalmente en publicaciones especializadas y que hasta el momento solo existían uno en Luxemburgo, dos en Italia, y el que hasta ahora se podía ver en Écija, siendo una pérdida irreparable⁵.

Creemos firmemente que el ámbito digital no puede devolvernos el patrimonio destruido pero nos proponemos avanzar en aras de una mejora de la documentación/catalogación, la puesta en valor y la difusión de objetos patrimoniales siendo éstas herramientas para el conocimiento del patrimonio por parte de la sociedad para su conservación [65].

1.4. Justificación de la investigación

Las manifestaciones de organismos internacionales dedicados a la protección y salvaguarda del patrimonio son realizadas mediante las cartas internacionales. Organismos como ICOMOS⁶, tienen como principal objetivo promover la teoría, la metodología y la tecnología aplicada a la conservación, a la protección y a la valorización de monumentos y sitios de interés cultural. Ya en la Declaración sobre el Levantamiento Arquitectónico o Carta del Rilievo se hace referencia a la importancia de adecuarse a las nuevas técnicas (en este caso, relacionado con el levantamiento arquitectónico):

*“Las actividades del levantamiento deben aprovechar las **nuevas posibilidades de elaboración que permite la informática**, tanto en el campo de la modelación sólida como de la comunicación multimedia [...]. Los datos, oportunamente estructurados y verificados, convergen en la realización de **sistemas de información** enfocados a la gestión del patrimonio histórico.” [12]*

⁴Arqueólogo municipal de Écija.

⁵Entrevista concedida a Agencia EFE el día 10 de marzo de 2015.

⁶International Council of Monuments and Sites, fundado en 1965 como resultado de la Carta de Venecia de 1964. Promueve los bienes que reciben el título de Patrimonio Cultural de la Humanidad.

Nótese la referencia al almacenamiento de datos en sistemas de información, aunque no menciona la componente geográfica de los datos en ningún momento a lo largo de la carta. Sin embargo, para nosotros será una cuestión importante. La elaboración de Sistemas de Información estaban a la orden del día, pero no tanto los Sistemas de Información Geográfica y las Bases de Datos Espaciales en este campo del conocimiento. Posteriormente, se conoce la potencialidad y transversalidad del SIG como apoyo a estas labores.

Seguimos esta justificación prestando ahora especial atención a la Carta de Cracovia 2000 donde se recogen los principios para la conservación y restauración del patrimonio construido:

*“La conservación del patrimonio edificado es llevada a cabo según el proyecto de restauración [...] este proceso incluye el estudio estructural, **análisis gráficos y de magnitudes** y la identificación del significado histórico, artístico y sociocultural.*

[...]

*Cualquier intervención que afecte al patrimonio, debido a su **vulnerabilidad**, debe estar estrictamente relacionada con su entorno, territorio y paisaje. **Los aspectos destructivos de la excavación deben reducirse** tanto como sea posible.*

[...]

*Como en el resto de los casos, los trabajos de conservación de hallazgos arqueológicos deben basarse en el **principio de mínima intervención**. Estos deben ser realizados por profesionales y la **metodología y las técnicas usadas deben ser controladas de forma estricta**.*

[...]

*En la protección y preservación pública, se deben **potenciar el uso de modernas tecnologías, bancos de datos, sistemas de información y presentaciones virtuales**.” [13]*

De esta aportación de la Carta de Cracovia extraemos tres importantes conclusiones:

- La primera de ellas es que nuestro campo de actuación (documentación gráfica) está estrechamente relacionado con la conservación del patrimonio construido.
- La segunda es el respeto al máximo del elemento adecuando las metodologías y las técnicas necesarias para ello.
- Y por último, debemos aprovechar el avance de las tecnologías para la protección y preservación pública del patrimonio.

Queremos contribuir a la protección, preservación y documentación gráfica de nuestro patrimonio arqueológico mediante el empleo de las más modernas

tecnologías láser, ópticas y fotogramétricas y, que a su vez, esta información no quede archivada, sino que sirva para diseminar este patrimonio histórico con ayuda de sistemas de información. Teniendo siempre presente la mínima intervención y el respeto hacia los elementos patrimoniales.

Pero el uso de dichas tecnologías es relativamente novedoso y se encuentra en procesos de estandarización. Según el artículo 10 de la Carta Internacional sobre la Conservación y la Restauración de monumentos y sitios o Carta de Venecia 1964:

*“Cuando las técnicas tradicionales se muestran inadecuadas, la consolidación de un monumento puede ser asegurada valiéndose de todas las técnicas modernas de conservación y de construcción **cuya eficacia haya sido demostrada con bases científicas y garantizada por la experiencia.**” [14]*

Basándonos en esta cita, este será otro de nuestros retos: **establecer base científica al respecto con el desarrollo de los protocolos.**

Son limitados los estudios donde se comparen este tipo de técnicas. Documentación, que de algún modo, nos permita estudiar cada técnica en igualdad de condiciones. Barrera Vera expone algunos motivos de esta carencia en su obra *Aplicación de tecnologías innovadoras en la documentación geométrica del Patrimonio Arquitectónico y Arqueológico* [6], anotando que el principal escollo con el que nos encontramos para realizar este tipo de estudios es que se trata de trabajos profesionales que se realizan, en condiciones normales, con presupuestos y plazos ajustados y, por lo tanto, es poco probable que se realice el levantamiento por dos procedimientos distintos con objeto de proceder a su comparación.

Todos sabemos que el mundo virtual ofrece enormes posibilidades, especialmente a la arquitectura o arqueología debido a la importancia de la componente gráfica. Nos adentramos en una línea de investigación vagamente conocida para la mayoría de nosotros (ingenieros de la edificación), pero aunque nos parezca que las tecnologías láser, ópticas y fotogramétricas son algo novedoso, lo cierto es que tienen años de historia, aunque anteriormente no se disponía de los recursos actuales. Y, por otro lado, la evolución de la transversalidad de los Sistemas de Información Geográfica y la amigabilidad del software para la construcción de Bases de Datos Espaciales provee un escenario óptimo para añadir valor geográfico a nuestros modelos tridimensionales.

1.5. Definición de marco y límites

Marco:

La presente tesis se encuadra dentro del estudio de diversas técnicas y metodologías para la obtención de información geométrica tridimensional y texturas de los elementos patrimoniales, aplicado a elementos arquitectónicos y arqueológicos. Dentro del marco de nuestro trabajo se encuentra el estudio de los sistemas de información como herramientas de análisis individualizado y generalizado, y cómo puede aportar valor geográfico y de difusión de los productos/modelos 3D generados.

Nuestro marco de estudio contempla:

- El capitel como elemento de estudio: nos hemos centrado en un elemento arquitectónico de pequeño tamaño dentro del conjunto de la arquitectura patrimonial, pero no por ello de poca importancia. A lo largo de la historia, los capiteles han sido portadores de los diferentes estilos y evolución arquitectónica [15]⁷. Por otro lado, el hecho de centrarnos en los capiteles para nuestro estudio no significa que estos protocolos obtenidos no puedan ser extrapolados a otros elementos arquitectónicos y arqueológicos, tras su análisis de adecuación y las oportunas modificaciones.
- Técnicas fotogramétricas, láser y ópticas: las técnicas empleadas han sido seleccionadas por la diversidad que nos ofrecen en obtención de datos, postprocesado de estos, resultados obtenidos y accesibilidad de los recursos necesarios⁸.
- Adentrarnos en el mundo SIG⁹ aplicado a nuestro proyecto: es bien conocido el potencial de las Bases de Datos Espaciales y su apoyo en las aplicaciones SIG como medio de georreferenciación y posterior análisis espacial avanzado, tanto gráfico como matemático [67]. Pero hemos detectado una falta de conexión entre estos y la posibilidad de documentar masivamente modelos tridimensionales generados a partir de densas nubes de puntos provenientes de metodologías de alta precisión, como la fotogrametría o el escaneado 3D. Trataremos por tanto de hacer un estudio de acercamiento entre técnicas, es decir, un acercamiento entre SIG y modelos geométricos.
- Analizar las herramientas de difusión posibles de nuestro producto.

⁷Debemos introducirnos en el estudio del capitel deteniéndonos de forma minuciosa en el detalle decorativo, su estructura, la proporción, sus cambios y su geometría. Según Marinetto, debemos observar su lugar de emplazamiento: es un punto de encuentro entre el elemento vertical de soporte con la horizontalidad del elemento sustentante. Marinetto llega más allá en la definición de capitel dentro de su obra *Los Capiteles del Palacio de los Leones en la Alhambra* (1997): es un traslado entre la tierra y el aire, el mundo y el cielo, el cuerpo y el alma; la columna es la persona y la cabeza será el capitel, el centro de las ideas.

⁸Los recursos necesarios y alcanzables serán de gran importancia a lo largo del desarrollo del proyecto, y haremos referencia a ellos en numerosas ocasiones.

⁹Sistemas de Información Geográfica.

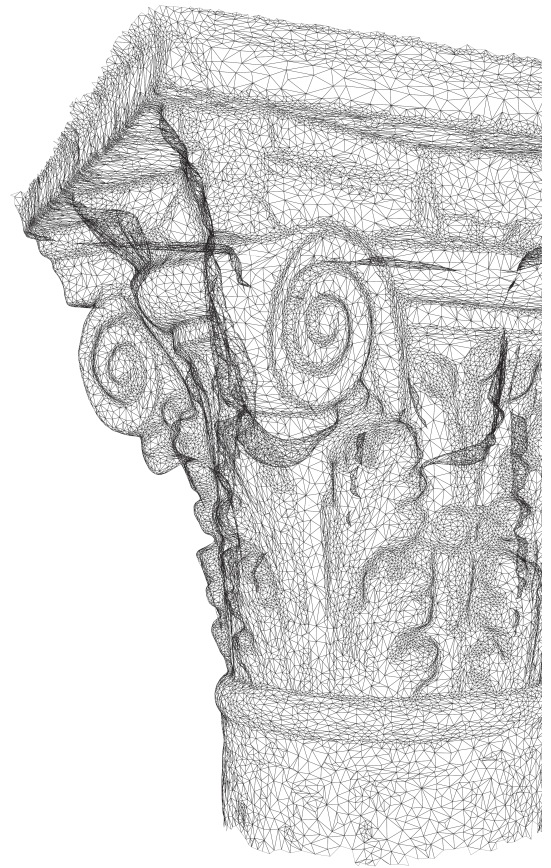
Límites:

Este proyecto cuenta con una serie de límites que permiten acotar la fase de digitalización, el desarrollo del sistema de información y las aportaciones en el ámbito de difusión de “producto”:

- Se pretende poner en práctica el método de digitalización en capiteles, pero no abarcar otros elementos de diversa índole arquitectónica/arqueológica. Aunque se haga mención a posibles extrapolaciones, queda fuera de nuestras fronteras.
- Se pretende desarrollar la visualización en mapas, pero no elaborar capas de geo-análisis. Aunque si se menciona su idoneidad.
- Se pretende el desarrollo de ideas de difusión del producto con ayuda de herramientas informáticas, pero sin llegar a abarcar un estudio de difusión del mismo.

Por último, somos conscientes de la existencia de multitud de tecnologías, y también métodos, para nuestra finalidad de digitalización tridimensional. Por ello se propone el estudio pormenorizado de tres de ellas (fotogrametría estereoscópica de corto alcance, escaneado óptico y láser). La elección de estas viene debidamente justificada en capítulos posteriores. También es importante resaltar la multitud de posibilidades en cuanto a software (tanto Open Source como propietario) que ofrecen las bases de datos espaciales y los SIG.

Objetivos



Capítulo 2

Objetivos

Objetivos principales:

Estableciendo como base la hipótesis de la existencia de una capacidad de mejora en la estandarización de la digitalización 3D dentro del ámbito del patrimonio cultural arqueológico y de la forma que los datos son obtenidos, gestionados y presentados, redactamos sendos objetivos principales para nuestro proyecto:

1. Elaborar un protocolo de levantamiento tridimensional de capiteles con el fin de ayudar a la estandarización de los procesos de digitalización, gestión y difusión.

Buscamos resultados de calidad métrica y visual suficientes de modo que puedan ser manejados por aquellos técnicos (arquitectos, restauradores, ingenieros, historiadores, arqueólogos,...) y público en general interesados en el estudio los mismos en proyectos donde la geometría y texturas jueguen un papel importante o hay indicios de que lo puedan tener.

2. Iniciar la elaboración de un proyecto de difusión de los modelos tridimensionales digitales, con el fin de aportar un valor añadido a la información generada en desarrollos anteriores de la investigación: valor analítico-geográfico y ayuda a difusión digital.

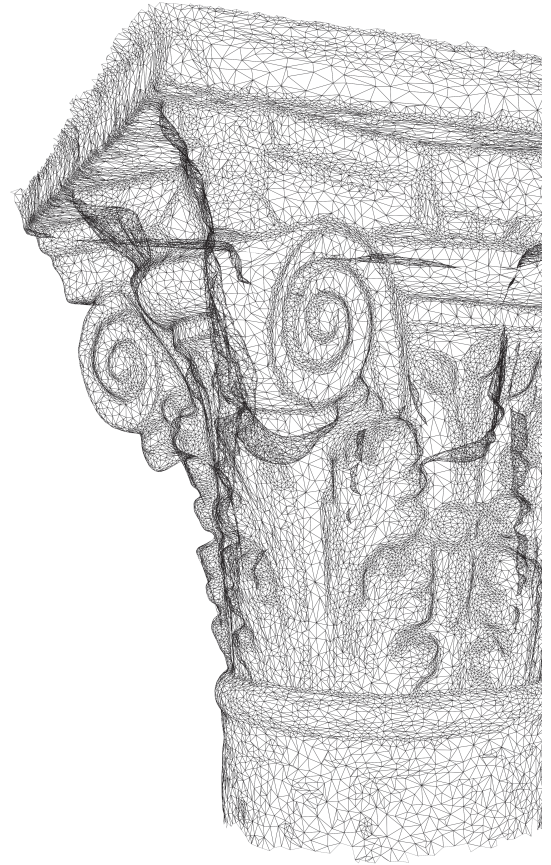
Creemos firmemente que la generación de un modelo tridimensional de alta precisión no tiene por qué ser una finalidad en sí misma. Nuestro “producto” debe ser la “materia prima” del siguiente eslabón. Entendemos que las siguientes fases podrían ser: difusión, estudio geométrico por menorizado o catalogación, entre otros.

Objetivos secundarios:

Para tratar de lograr su consecución realizaremos las siguientes tareas marcadas como objetivos específicos en nuestro proyecto:

1. Analizar las posibles técnicas existentes a emplear en la digitalización tri-dimensional. Prestando especial atención a factores como respeto a los elementos y recursos materiales necesarios.
2. Evaluar la adecuación de las técnicas a un caso de estudio concreto mediante la realización de una sencilla puesta en práctica del análisis inmediatamente anterior.
3. Aplicar las primeras conclusiones para la elaboración de un proyecto complejo.
4. Simular un proyecto de difusión ayudado por nuevas tecnologías como los SIG y la Realidad Aumentada, que pueda servir para la difusión del patrimonio y para la gestión de la información por parte de investigadores y profesionales del patrimonio.
5. Proporcionar visibilidad web a los resultados de la investigación e idea de difusión mediante nuevas tecnologías.

Metodología



Capítulo 3

Metodología

El marco metodológico propuesto para lograr la consecución de nuestros objetivos se divide en las siguientes fases:

Primera fase: Constituye el establecimiento de las bases de la investigación:

- Se describen nuestras inquietudes mediante una breve introducción. Ponemos en duda la realidad existente en el ámbito de la investigación y se comienza a definir el problema en base a: su planteamiento, sus límites y marco, y su justificación. Todo ello se desarrolla en el primer capítulo de nuestro documento.
- Se redactan los objetivos de la investigación en base a lo descrito en el capítulo anterior. Se proponen objetivos principales y secundarios de carácter claros, simples y realistas que permitan la consecución de los mismos en esta primera fase de la investigación. Los objetivos son documentados en el capítulo 2.
- Se establece un marco metodológico que nos permita la organización de las tareas y nos lleve a la consecución de los objetivos marcados. Se documenta en el presente capítulo 3.
- Se realiza un estudio del estado científico-técnico actual basado generalmente en artículos científicos y tesis doctorales de nuestro ámbito y de otros ámbitos relacionados, contrastando y complementando nuestro estudio con profesionales e investigadores, especialmente del campo de la arqueología. A partir de las conclusiones obtenidas del estado de la cuestión

se reformulan los objetivos expuestos y se extraen las primeras conclusiones para seguir por el camino adecuado en nuestra línea de investigación. Esta información se engloba dentro del capítulo 4.

Segunda fase: Es la fase de la investigación donde el levantamiento digital 3D es llevada a cabo. Se organiza dentro de la parte I (capítulos 5 y 6). Tiene la siguiente estructura:

- Análisis y elección de técnicas/herramientas: donde se desarrolla un estudio de diversas técnicas de digitalización a nuestro alcance y se establecen aquellas a emplear en nuestra investigación.
- Primeros ensayos: donde se realiza el primer levantamiento como propuesta de protocolo. El capitel elegido pertenece al Cenador de Carlos V del Real Alcázar de Sevilla.
- Puesta en práctica con la realización de un proyecto de levantamiento de capiteles completo del Patio de las Muñecas situado en el Real Alcázar de Sevilla.

Tercera fase: La tercera fase hace referencia al inicio del desarrollo de ideas propuestas para el aporte de valor añadido a los modelos tridimensionales creados. Se documenta en las partes I y II (capítulos 7 y 8):

- En primer lugar se realizan unos desarrollos con el fin de exponer la propuesta de vinculación entre modelos 3D y otras nuevas tecnologías que nos aportan valor analítico-geográfico y de difusión del conocimiento.
- Todo lo desarrollado en el apartado anterior es publicado online al acceso de cualquier interesado.

Cuarta fase: La última fase corresponde al análisis de las conclusiones extraídas durante el periodo de investigación y al establecimiento de las futuras líneas de investigación. Esta fase se documenta en el capítulo 9.

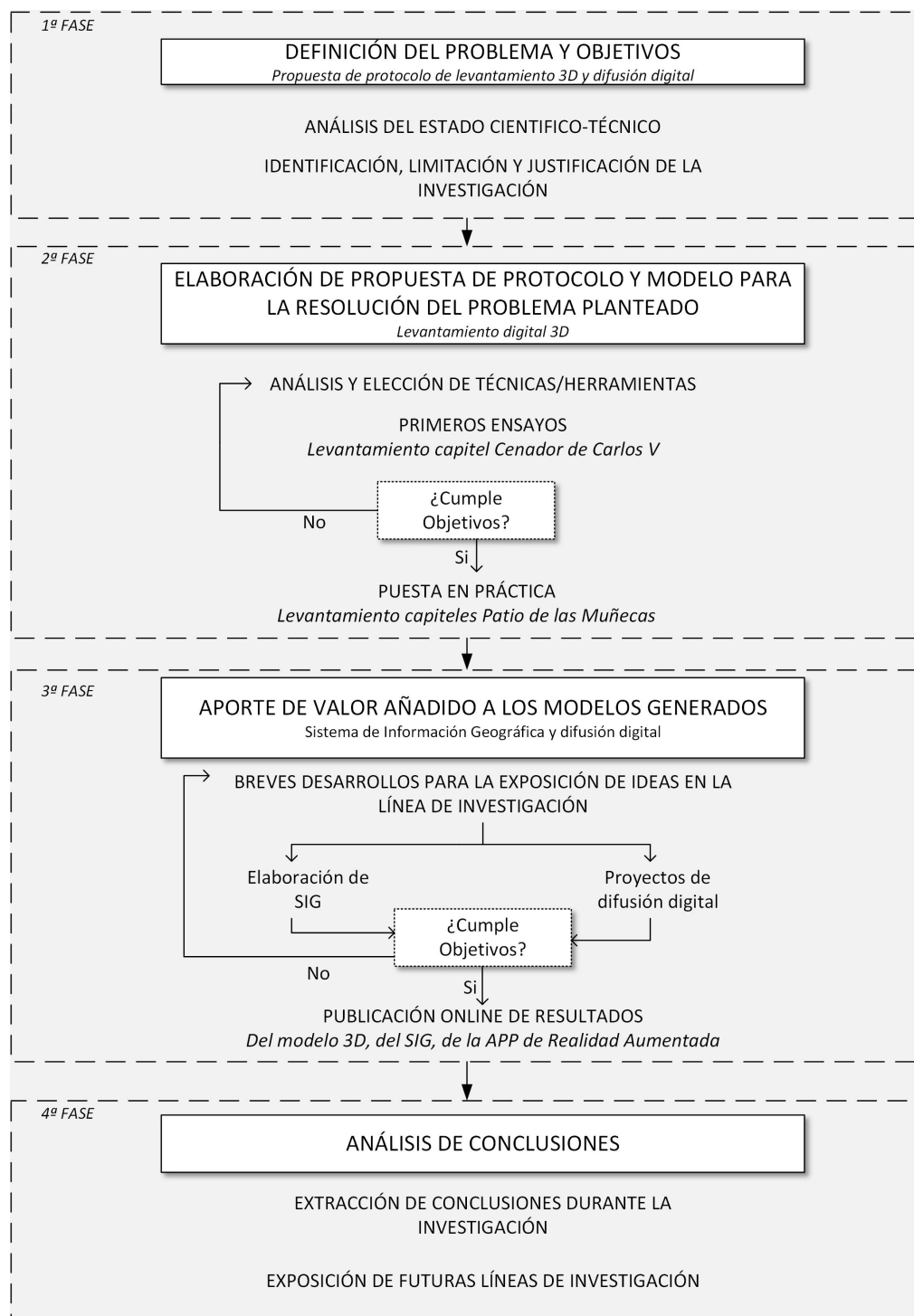
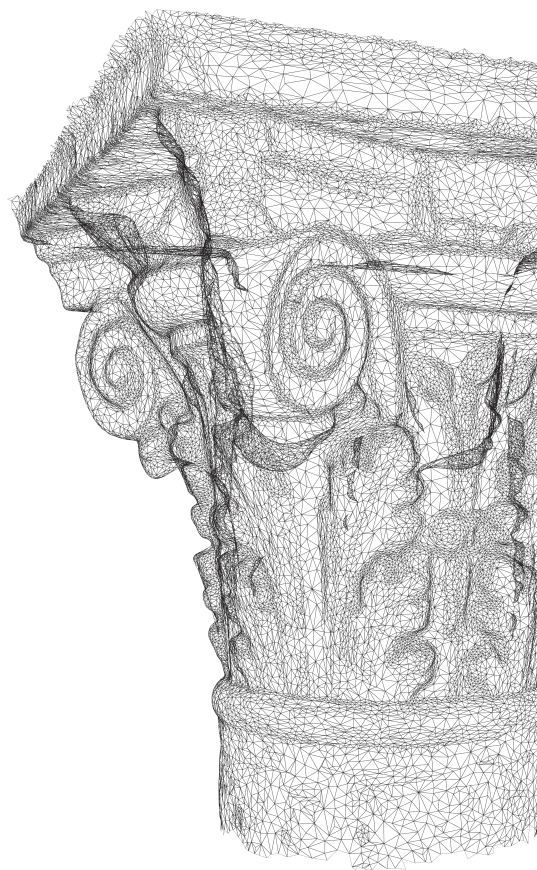


Figura 3.1: Árbol metodológico de la investigación. Fuente: elaboración propia.

Estado científico-técnico



Capítulo 4

Estado científico-técnico

Antes de comenzar, parece oportuno una breve introducción de los organismos internacionales a los que ya hemos hecho referencia y seguiremos haciéndolo a lo largo de este apartado:

El comité Científico Internacional para la Documentación del Patrimonio Cultural (CIPA)¹ es uno de los comités internacionales del Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS)² y en su establecimiento contó con la colaboración de la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos (ISPRS)³. El principal objetivo de CIPA es la mejora de todos los métodos para la inspección de los monumentos y sitios culturales [16], especialmente los obtenidos por la combinación de métodos relacionados con la fotogrametría y la ayuda de técnicas que permitan registrar el entorno.

Como mencionamos ISPRS e ICOMOS crearon CIPA, ya que ambos creen de forma firme que un monumento solo puede ser restaurado y protegido cuando se ha medido y documentado plenamente, su desarrollo ha sido documentado una y otra vez (es decir, se ha elaborado un seguimiento) y se ha tenido en cuenta su entorno.

En la actualidad CIPA organiza simposios internacionales cada dos años, en conjunto con ISPRS e ICOMOS. En estos eventos se presentan trabajos desarrollados por especialistas en el trabajo de la fotogrametría que van marcando pautas para aquellos que les seguimos [17]–[20].

¹The International Committee for Documentation of Cultural Heritage.

²The International Council on Monuments and Sites.

³The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

4.1. Síntesis sobre la protección del patrimonio en las cartas internacionales

El patrimonio arquitectónico y arqueológico constituye el testimonio esencial de las actividades humanas del pasado. Su protección y su adecuada gestión son imprescindibles para permitir a los arqueólogos y a otros científicos estudiarlo e interpretarlo. La protección de este patrimonio no puede basarse únicamente en la aplicación de técnicas arqueológicas tradicionales, conforme a las cartas citadas anteriormente [12], [14].

La protección de este patrimonio debe basarse en una colaboración efectiva entre especialistas de múltiples y diversas disciplinas. Exige también la cooperación de las instancias de la Administración, de investigadores, de empresas privadas y del gran público. Por consiguiente, estas cartas establecen unos principios aplicables a los distintos sectores relacionados con la gestión del patrimonio arqueológico.

Con nuestro perfil técnico intentamos poner nuestro pequeño aporte en el proceso de protección. Intentamos involucrarnos en el subproceso de documentación aportando rigurosidad técnica. Rigurosidad sobre la cual, expertos en la materia, puedan fundamentar análisis arqueológicos o históricos. Para ello nos valemos de las más modernas técnicas de levantamientos, y en ello se fundamenta nuestro estudio.

Por supuesto, las técnicas de levantamiento no son solo aplicables a este sentido de documentación patrimonial, ni siquiera nacieron para ello. Su evolución hacia este campo ha sido un camino más de la infinidad de aplicaciones posibles. En este sentido cabe preguntarnos la siguiente cuestión: ¿Qué entendemos por levantamiento aplicado a documentación gráfica patrimonial?

Con el término levantamiento se entiende el conjunto de investigaciones y operaciones orientadas a determinar las características significativas bajo los aspectos morfológico, dimensional, figurativo y tecnológico de un elemento edificado o de un conjunto. Para evaluarlo e investigarlo, con el propósito de construir un modelo tridimensional simplificado, a través del cual se pueda analizar la obra, facilitando así la interpretación de sus fases de transformación y de los diversos aspectos referidos a los temas más representativos. El levantamiento es, por tanto, un proceso que debe llevar al conocimiento profundo de la obra en estudio, con el fin de poner en evidencia todos sus valores, tanto geométricos como dimensionales, figurativos como estructurales, desde los materiales empleados y las técnicas constructivas, hasta las condiciones de degradación y las relaciones con el contexto que lo rodea [12].

4.2. Tecnologías para la adquisición de datos digitales en el ámbito patrimonial

Las tecnologías de adquisición 3D empleadas en el ámbito patrimonial, y que se mencionan en la presente investigación, nunca fueron desarrolladas de forma exclusiva para dicho fin. Este tipo de tecnologías nace del campo de la ingeniería inversa y la necesidad de controlar procesos de fabricación en serie, ayudando a las tareas de control de calidades dimensionales. Además, la mayoría de herramientas especializadas y diseñadas para la conservación son solo útiles para tareas específicas, basadas en distintos procedimientos que impiden la interacción con otras [18].

A continuación, se desarrolla de forma sucinta la evolución de aquellas tecnologías más relevantes empleadas en algún momento del presente trabajo.

Fotogrametría:

En la última década se ha producido un desarrollo exponencial en el campo de los ordenadores y la fotografía digital. A su vez, ha existido una reducción de costos de todo el equipamiento necesario. Estos factores han propiciado un ambiente óptimo para la evolución de la fotogrametría digital, que ahora se centra en automatizar al máximo las tareas que requieren de operadores experimentados. Dichos procesos de automatización están estrechamente vinculados con el desarrollo digital.

Otra parte menos mencionada, pero muy importante en los levantamientos son las redes de puntos de apoyo. En este sector también se han producido grandes avances en la última década. Dichos avances vienen de la mano de la evolución del instrumental empleado para el levantamiento de los puntos. Gracias al distanciómetro láser provistos en las estaciones totales electrónicas, el levantamiento de puntos de apoyo se convierte en un proceso ágil, ofreciendo a la restitución fotogramétrica una base precisa sobre la que calcular las geometrías. Los trabajos de levantamiento mediante la fotografía digital pueden resolver proyectos sin que los costos de un equipo completo sean excesivos. Todo dependerá de los requerimientos específicos de los proyectos.

El proceso tiende hacia la automatización y la fase de toma de datos está dominada por una cámara fotográfica digital convencional. Cualquier elevación de la cámara, de mucho menor peso y fragilidad, se puede resolver, por ejemplo, mediante una pértiga telescópica, como ya se ha realizado en otros proyectos dentro de este departamento [21]. La estabilidad fotográfica se resuelve con una velocidad de obturación elevada de un simple disparo fotográfico. La cantidad de fotos a realizar, además de ser rápidas e independientes entre sí, es dependiente del área a cubrir y con otra ventaja añadida: las diferentes distancias al objeto a levantar permiten el trabajo con diferentes calidades de detalle, algo que no hace el láser (a priori, ya que si se pueden realizar varios escaneos a distintas resoluciones); y permiten acercarnos a aquellos huecos donde un láser jamás llegaría y que un operador más o menos hábil tendría que rellenar por

invención en una fase de post-procesado.

Profundizando en las definiciones adoptadas por organizaciones especializadas podemos encontrar lo siguiente:

- Fotogrametría es la ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de las fotografías, para de esa manera obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición), del objeto fotografiado. Esta definición es la adoptada por la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos (ISPRS) [22].

La documentación patrimonial a partir de imágenes fotográficas se remonta a los orígenes de la fotografía a mediados del siglo XVIII, presentando el desarrollo de la fotogrametría gran correlación con el desarrollo de la fotografía a lo largo de la historia [6], y especialmente con el desarrollo de la fotografía digital. Louis Degarre anunció el revelado fotográfico en 1839. En 1858, C. Laussedat realizó su primer mapa a partir de fotos aéreas y terrestres. En 1858, A. Meydenbauer tuvo la idea de utilizar fotografías estereoscópicas para documentar edificios. Este autor estuvo convencido de que había que documentar los elementos patrimoniales más relevantes sistemáticamente, de manera que pudieran ser reconstruidos en caso de destrucción. En 1893, Meydenbauer da nombre a la técnica: fotogrametría [2].

Posteriormente, vendrían las etapas de la fotogrametría analógica, analítica y digital en sus múltiples versiones: fotogrametría de objeto cercano, fotogrametría terrestre, fotogrametría aérea y fotogrametría satélite. A partir de la etapa digital, a principios de 1990, es cuando comienza paulatinamente a utilizarse la fotogrametría digital en las labores de documentación patrimonial, primero a partir de escaneado de película fotográfica, y luego partiendo de la base de la imagen digital. A finales del siglo XX, la automatización en los procesos de producción fotogramétrica comienza a ser una realidad gracias al avance científico en otros campos como la electrónica, la fotónica, el reconocimiento de patrones y la visión por computador.

La fotogrametría a partir de imágenes digitales siempre se ha considerado una técnica de medición precisa, detallada, que proporciona datos tanto en 2D como en 3D de manera efectiva, y resuelve muchos de los inconvenientes de las tomas analógicas. Algunas de las ventajas que reportaron la evolución de las imágenes digitales en el proceso fotogramétrico son [23]:

- Gran cantidad de información, independientemente de la escala, a resolución variable y configurable.
- Extracción de información métrica y radiométrica, muy precisa, sobre todo si los sensores de captura de imagen están bien calibrados.
- Datos en 2D o en 3D, en función de la información existente, gracias al formato ráster.
- Capacidades de visualización estereoscópica.

- Versatilidad de uso a partir de instrumental relativamente económico.

Un cambio sustancial en el desarrollo de la fotogrametría ha sido el poder trabajar con imágenes digitales rectificadas a partir de software de fácil acceso. Fue entonces cuando, según Patias, las mayores desventajas de la fotogrametría comenzaron a desaparecer, abriendo las puertas a nuevos ámbitos de aplicación a una técnica hasta entonces muy centrada en el ámbito profesional [17]:

- Uso de instrumental digital.
- Uso de cámaras digitales convencionales (menor coste y mayores resoluciones).
- Software a menor coste y de fácil manejo.
- Reducción de las necesidades y requerimientos de apoyos topográficos.



Figura 4.1: Aproximación a la orto-fotografía: funeraria etrusca (s. IV-III a.C.).
Fuente: Ruiz de la Rosa, 1986.

Láser Escáner Terrestre (TLS):

A principios del siglo XXI el escaneado 3D revolucionó la captura automatizada de grandes nubes de puntos, permitiendo la medición en 3D de superficies complejas en cortos períodos de tiempo, a altas frecuencias (inicialmente cientos o miles de puntos por segundo, hoy en día esta cifra se acerca al millón), en tiempo real y junto con valores de intensidad o color asociados. El usuario accede directamente a las coordenadas XYZ, entre otra serie de datos (como características del acabado del material), proporcionadas por el escáner.

Estos equipos han experimentado evoluciones importantes en cuanto a facilidad de uso, manejabilidad, autonomía y velocidad de toma de puntos. Los últimos modelos en el mercado llegan a registrar valores cercanos al millón de puntos por segundos. Si observamos el Datasheet del Leica P20 nos indica una velocidad superior el millón de puntos por segundo (velocidad instantánea máxima). O la del Faro Focus 3D, de 976.000 puntos por segundo. Cuando sus hermanos mayores no pasaban de los 50.000 puntos por segundo como velocidad instantánea máxima. Debemos tener presente que el aumento se debe a la evolución de la capacidad de cálculo. En gran medida, estos avances se deben a la evolución en cuando capacidad de cálculo. El resultado son densas nubes de puntos 3D compuestas por mediciones individuales en un sistema de coordenadas XYZ, que en sí mismas componen un modelo tridimensional de los objetos registrados. Modelo que puede alcanzar gran realismo ya que estos puntos pueden reflejar el color de la superficie registrada. El láser escáner es empleado en multitud de aplicaciones, tanto en proyectos de ingeniería como de arquitectura, y se ha convertido con éxito en un equipo habitual en proyectos relacionados con la documentación patrimonial.

Sin embargo, sigue teniendo una serie de inconvenientes importantes que pueden llegar a ser más o menos influyentes dependiendo del proyecto. Entre ellos está su elevado precio, el requerimiento de personal especializado para la toma de datos y sobre todo el procesado de los mismos, la necesidad de la estabilidad del instrumental y en ocasiones las dificultades de transporte.

4.3. Metodologías para la captura de datos 3D en el ámbito patrimonial

La técnica de digitalización tridimensional ha sido aplicada a una gran variedad de campos durante su no tan larga historia. Además de su empleo en el entretenimiento, diseño industrial, la creación de prototipos, y la medicina, la digitalización 3D de alta precisión camina actualmente para consolidarse como una práctica común en la documentación patrimonial [3]. El principal motivo es que la digitalización tridimensional es capaz de ofrecer soluciones para una

gran variedad de necesidades. Si nos centramos en nuestro campo de aplicación: permite preservar nuestro legado patrimonial arquitectónico y arqueológico de una forma no alcanzable hasta la aparición de estos métodos y, a la vez, aumenta las posibilidades de difusión hacia la sociedad, con todas las ventajas de concienciación y estudio que ello conlleva.

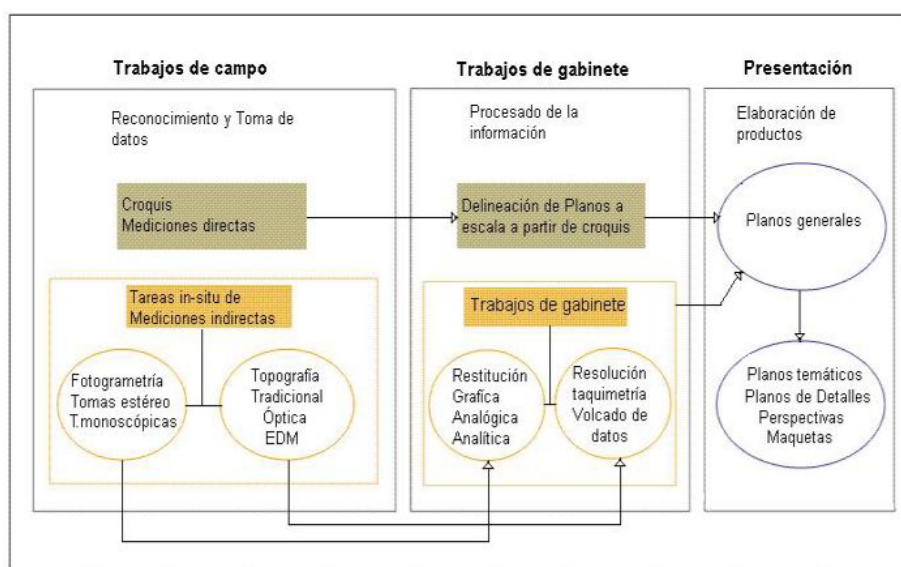


Figura 4.2: Metodología de levantamiento. Trabajos de campo, de gabinete y resultados. Fuente: Barrera Vera, 2006.

Es en torno al año 2007 cuando podemos apreciar como comienzan a proliferar los estudios científicos en pro de la fusión de distintas metodologías. Derivado, tal vez, de la estabilización del desarrollo de los métodos por individualizado y la necesidad de documentar elementos de muy diversa índole, y por qué no, de la necesidad de producir nuevo conocimiento. Los proyectos de investigación que involucraban el análisis del uso de diferentes métodos de digitalización de forma conjunta han sido positivos. Este tipo de metodología ha sido capaz de producir arquitecturas, monumentos o sitios arqueológicos 3D de gran precisión, densidad de datos, fotorrealistas y con definición variable, según intereses de los proyectos [24]–[27].

Pero en realidad, en la gran mayoría de los proyectos de digitalización 3D, quién define su amplitud, alcance y tecnologías a emplear es el plan financiero. Para proyectos de bajo presupuesto la compra o alquiler de equipos de digitalización de gama alta resulta prohibitivo [6]. Es en este aspecto donde realmente se impone las técnicas de bajo coste [28]–[30]. La denominación “técnicas de bajo coste” a menudo implica renunciar a equipos tecnológicos de última generación, aunque ello no quiera decir que los requerimientos del proyecto puedan verse afectados.

Existe un interés manifiesto de la ciencia hacia este nuevo tipo de metodologías (nos referimos a las denominadas “bajo coste”). Son concedidos proyectos de investigación I+D+i para estudios de adecuación de las mismas. Por ejem-

plo, el Proyecto de Investigación I+d+i HAR2011-25413, titulado “Ensayos de restitución fotogramétrica de bajo coste mediante fotografía digital; aplicado al levantamiento de obras de Chillida y Oteiza”, gestionado por la Universidad de Valladolid y el investigador Montes Serrano como Investigador Principal.

En la actualidad existe una importante variedad de metodologías para adquisición 3D, que permite una gran flexibilidad para, de un modo u otro, lograr en gran medida los objetivos de digitalización, a veces tan específicos para cada proyecto [31], [32]. Estas metodologías pueden ser clasificadas: de contacto y sin contacto. Las metodologías de contacto no son habituales en el ámbito del patrimonio, debido a la fragilidad, interés y el estrés añadido que supone a los elementos. Por otro lado, las metodologías sin contacto siguen evolucionando hoy día dentro de nuestro ámbito de estudio y han sido, y son, empleadas con éxito en multitud de proyectos de digitalización del patrimonio [33]–[35].

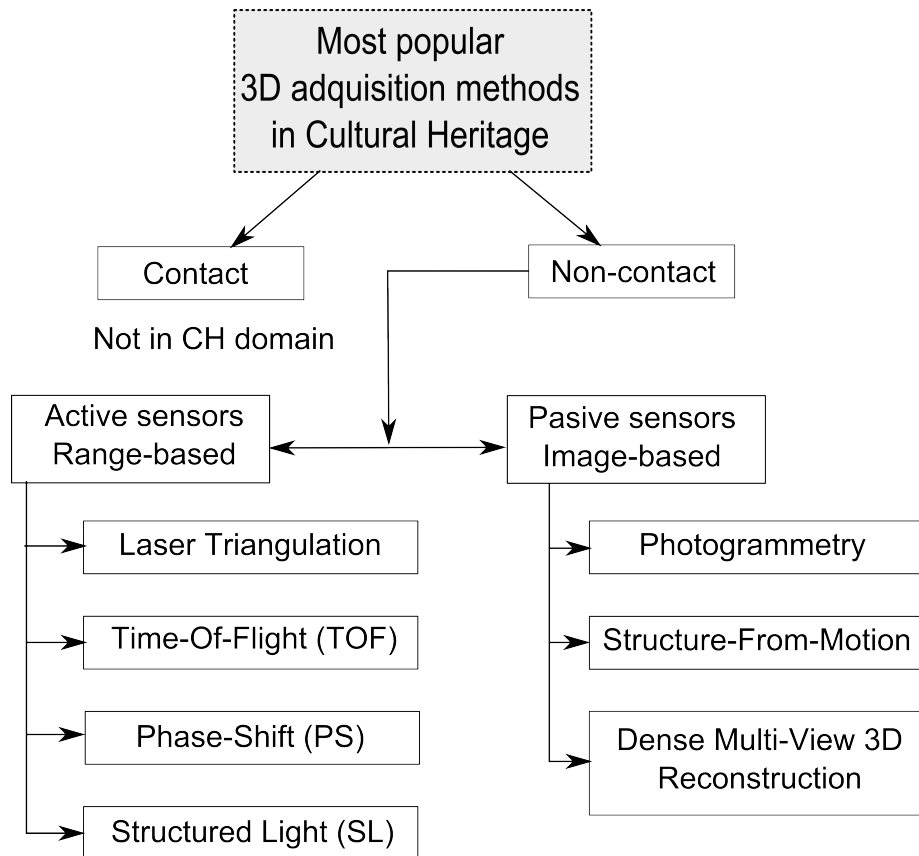


Figura 4.3: Esquema sobre las metodologías de adquisición 3D más usuales en la digitalización del patrimonio. Fuente: Elaboración propia a partir de bibliografía, 2013.

De acuerdo con la bibliografía, los sistemas sin contacto se dividen en sistemas activos y pasivos [36]. Esta división se basa en la naturaleza de los sensores de los escáneres. Los activos captan la luz o radiación emitida por el mismo

sistema de digitalización. Mientras que los pasivos se basan en la detección de la luz visible reflejada sobre los objetos.

Analizando los métodos de adquisición activos (a menudo denominados como “range-based”, uno de los más utilizados en nuestro ámbito es el láser por triangulación (también “Laser Triangulation” o “LT”). Este método está basado en un sistema provisto de una fuente láser y un detector óptico. La fuente láser emite radiación en forma de línea o patrón sobre la superficie del objeto, mientras que el detector óptico capta las deformaciones que se producen debido a las características morfológicas del objeto. La profundidad es calculada utilizando el principio de triangulación. Los sistemas láser por triangulación son conocidos por su gran precisión en las mediciones geométricas (¡50 micras) y la capacidad para realizar muestreos densos, generando por tanto densas nubes de puntos. Son ampliamente utilizados para la digitalización de pequeños elementos [37].

El método activo de tiempo de vuelo (también “Time-Of-Flight” o “TOF”) es comúnmente empleado en la digitalización 3D de elementos de grandes dimensiones (a nivel de edificio, área urbana, monumentos, acantilados, excavaciones, etc...). El método se basa en un telémetro láser que se utiliza para detectar la distancia de una superficie mediante el cálculo de tiempo que tarda el pulso de luz en ir y volver a la fuente de emisión. La exactitud de este sistema está estrechamente relacionada con la precisión de su temporizador. Para rangos de mediciones altos, los sistemas TOF proporcionan excelentes resultados [38]. Por otro lado, cuando se trata de rango de mediciones menores es preferido el empleo de sistemas basados en diferencia de fase (también “Phase-Shift” o “PS”), que ofrecen resultados más precisos y menores tiempos de captura.

Son numerosas las investigaciones basadas en la comparación o descripción de estos sistemas [39]. Una de ellas, desarrollada por el equipo de fotogrametría de la Universidad de Valladolid, estudia la diferencia de resultados en un mismo levantamiento. Por un lado, emplean el Leica ScanStation C10 (sistema Tiempo de vuelo), y por otro, el Faro Photon 80 (sistema diferencia de fase). Este estudio concluye (teniendo en cuenta en el proceso de comparación factores externos a los sistemas, como pigmentación y materiales) que:

“The comparative study and the investigation of possible reasons behind differences lead us to determining that the Faro Photon Laser Scanner achieves less absolute accuracy compared to the Leica ScanStation C10 which on the other side is slightly less capable of resolving very small details.

Arguably phase-shift scanners are profiled as the technology of the future for architectural heritage scenario, while pure time-of-flight technology might have found its physical limits. Having said that, we have verified that, a last generation TOF gun, can successfully compete and even surpass the not-so-new but still up-to-date PS technology present in the Faro Photon 80”[40].

Otro método activo muy extendido en nuestro ámbito es la luz estructurada (“Structured Light” o “SL”). Se basa en la proyección de una secuencia de patrones bidimensionales de luz sobre la superficie de un objeto. Mediante el

control de las deformaciones de estos patrones proyectados es capaz de extraer la geometría 3D. Las investigaciones realizadas con estos métodos permiten decir que el uso de patrones de franjas en las proyecciones ayudan a maximizar las resoluciones de las mediciones [32].

A continuación realizamos un análisis del estado de los métodos pasivos (Image-based). Algunos autores los denominan como la versión pasiva de los SL [30]. Los métodos basados en imágenes se tratan de métodos de bajo costo en términos de equipamiento, pero requieren de tareas delicadas para lograr buenas precisiones. Dependiendo del modo de trabajo, puede requerir grandes recursos temporales de técnico en gabinete tratando datos. La fotogrametría es uno de los métodos basado en imágenes más extendido en nuestro ámbito. Es empleada para determinar las propiedades geométricas 2D y 3D de los objetos visibles en un conjunto de imágenes.

La determinación de la posición y las características geométricas intrínsecas de la cámara se conoce como el problema fundamental fotogramétrico (también existe literatura al respecto que lo describe como orientación externa e interna de la cámara), así como las coordenadas 3D de los puntos recogidos en el conjunto de imágenes.

Según la bibliografía, la fotogrametría puede ser dividida en dos categorías: la fotogrametría aérea y la fotogrametría terrestre. En fotogrametría aérea, las imágenes se adquieren a través de tomas aéreas desde un avión o un UAV. Mientras que en fotogrametría terrestre las imágenes se capturan desde lugares cercanos o en la superficie de la tierra. Además, cuando el tamaño del objeto y la distancia entre la cámara y el objeto es menor de 100 m, se hace la distinción de fotogrametría de corto alcance (“close-range photogrammetry”) [41].

Actualmente existe un amplio abanico de software fotogramétrico, comercial y abierto. Estas aplicaciones son capaces de realizar tareas como la calibración de la cámara, los cálculos geométricos y la elaboración de una malla 3D con textura en un corto espacio de tiempo, y de forma automática o semi-automática. Además, los datos de entrada pueden provenir de cámaras digitales convencionales, que siendo empleadas en condiciones adecuadas pueden dar resultados de alta precisión. Este método puede ser considerado objetivo y fiable. El empleo de las últimas versiones de software fotogramétrico para la realización de levantamientos, convierten al proceso en algo simple y de bajo coste, y combinándolo con apoyo de puntos de control tomados con estación total, puede producir modelo tridimensionales realmente fieles incluso a grandes escalas [32].

Los últimos avances en los métodos “image-based” están muy relacionados con el desarrollo de la potencia de cálculo de los ordenadores y la evolución de los sensores fotográficos. Este desarrollo de los ordenadores ha permitido dar grandes pasos hacia la evolución de los métodos fotogramétricos a procesos semi-automatizados. Un claro ejemplo de ello, son los métodos “Structured-From-Motion” o “SFM” y “Dense Multi-View 3D Reconstruction” o “DMVR”, que pueden ser considerados como la evolución o la extensión de los tradicionales métodos basados en imágenes. Son varios los software que implementan algoritmos derivados del SFM-DMVR y que están disponibles actualmente. El SFM es considerado como una extensión de la visión estereoscópica donde, en

lugar de pares de imágenes, el método intenta reconstruir la profundidad de un número de imágenes no ordenadas que recogen información de una escena estática a partir de puntos de vista arbitrarios. Principalmente, el método utiliza las áreas de solapamiento entre imágenes para establecer píxeles homólogos y calcular los parámetros internos y externos de la cámara. Estos parámetros están relacionados con la longitud focal, el formato de imagen, el punto principal, los coeficientes de distorsión de la lente, la ubicación del centro de proyección y la orientación de la imagen en el espacio 3D [30]. Numerosos software contienen el método de ajuste de haces con el fin de mejorar la precisión de cálculo, la posición de la cámara y minimizar errores.

Uno de los software SFM desarrollados en los últimos años es Bundler⁴. Es un software desarrollado en C y C++ [42] para el trabajo sobre paquetes de imágenes no ordenadas. Bundler produce una reconstrucción en 3D de las posiciones de las cámaras y de la geometría de la escena. Pero los datos geométricos de salida son definidos por el propio autor del software como escasos. Para solucionar este problema de densidad de la nube de puntos es necesario un trabajo posterior. Se trabajan los datos de salida con el software PMVS2. En este caso es necesario cambiar el formato del software Bundler a PMVS utilizando Bundle2PMVS.

Los sistemas SFM se muestran ideales para el trabajo sobre imágenes desordenadas y con la única relación de la escena capturada. La investigación del Dr. Salvatore Barba y Sara Morena en el Laboratorio Modelli de la Unisità degli Studi di Salerno así lo demuestra. Dicho estudio analiza un proyecto de digitalización 3D logrado mediante una serie de imágenes, conseguidas a través de diferentes medios no destinados a este fin (internet, fotógrafos aficionados, turistas, etc...) de un monumento destruido. En este caso el software SFM empleado fue PhotoScan en su versión v0.9, de la compañía rusa Agisoft LCC.

VisualSFM es otro de los famosos software basado en sistemas de SFM. VisualSFM es una aplicación GUI (Graphical User Interface) para la reconstrucción de las escenas 3D empleando los sistemas Structured-From-Motion. Es un software que integra varios de los proyectos anteriores de su desarrollador, Wu, y aprovecha al máximo las posibilidades multi-núcleo de los ordenadores actuales. A su vez, su software integra también el trabajo presentado por Furu-kawa que es capaz de ignorar los objetos no rígidos (por ejemplo, los peatones que pasa por delante de un edificio en la fase de toma de datos) [43].

Por otra parte, el proyecto financiado por la UE para 3D COFORM [44] se centra en la evolución de un sistema similar. Han presentado ARC 3D: un servicio web en el que el usuario carga una colección de imágenes y el sistema devuelve una reconstrucción 3D (densa) de la escena. La reconstrucción 3D resultante se crea utilizando la tecnología de la computación en nube (servidores) y se puede descargar y analizar por software, ya sea de open-source, como Mesh-Lab (software que ellos recomiendan por su estrecha vinculación), o propietario. Se abren muchísimas posibilidades en este tipo de servicios web. Otra de ellas es la aplicación de Autodesk, llamada 123D Catch [45]. En definitiva, se trata de

⁴Se distribuye para plataformas Linux y Windows. La última versión disponible es la v0.4, que fue lanzada el 10 de abril de 2010 (a fecha de noviembre de 2014).

subir un conjunto de imágenes coherentes y con unas mínimas pautas (también es posible subirlas directamente desde el móvil con su App) para obtener un modelo 3D, que posteriormente puedes publicar y compartir en su plataforma web. Como apuntamos, son multitud las aplicaciones de este tipo que han aflorado en los últimos años (como Hypr3D, Insight3D [46], y muchas otras).

Hasta ahora solo hemos hablado de los sistemas de SFM-DMVR bajo software open-source, pero también los podemos encontrar en software de pago. Eos Systems Inc. ofrece PhotoModeler escáner y, en la misma línea, Agisoft ofrece PhotoScan. Estas soluciones de software SFM-DMVR pueden fusionar los mapas de profundidad de cada una de las imágenes y luego producir un vértice con color creando una nube de puntos de diferentes densidades que se puede convertir a una malla triangulada 3D. La edición profesional del software es capaz de ofrecer, aparte de las reconstrucciones de alta calidad en 3D, ortofotos, modelos digitales de elevación y modelos 3D georeferenciados.

El color de la superficie, la reflectividad y la transparencia son factores que afectan a la capacidad de un sistema de adquisición para capturar la forma de un objeto. Existen investigaciones actuales centradas en el desarrollo de metodologías que son capaces de capturar objetos de características adversas. Bajard et al. [47] describe un método donde los enfoques de triangulación láser clásicos fallan. El método propuesto se basa en la emisión de un patrón que aumenta la temperatura de la superficie del objeto (una cuchara metálica). La zona calentada emite una radiación infrarroja que se observa mediante una cámara de infrarrojos.

Quizás con el afán de minimizar desventajas y aunar las ventajas de cada de los métodos (entre otros motivos), en los últimos años las líneas de investigación se han desarrollado hacia la combinación de la fusión de métodos con el fin de mejorar la calidad de los datos y obtener mejores resultados. Aunque, tales combinaciones no siempre son posibles, la bibliografía demuestra su adecuación en muchos de los casos con resultados excelentes [26].

Además de la captura de alta precisión de la geometría, los esfuerzos de investigación se han dirigido también a la adquisición precisa de las propiedades de las superficies. El alcance principal es determinar el comportamiento de una superficie (por ejemplo, la reflexión) causada por una luz incidente, sus posiciones de iluminación y de punto de vista. Barba et al. [48] han conseguido recreaciones fotorrealísticas mediante el empleo del escáner óptico de triangulación Vivid, de Konica Minolta, y procesado con herramientas informáticas de propietario, como Geomagic Studio.

4.4. Ejemplo de aplicación SIG al ámbito patrimonial

No es novedosa la aplicación de los sistemas de información al ámbito patrimonial, y desde los últimos años tampoco lo es disponer de un módulo geográfico en dichos sistemas de información que permita análisis geoespaciales [67]. Un claro ejemplo de ello es el Sistema de Información del Conjunto Arqueológico de Carmona (SICAC).

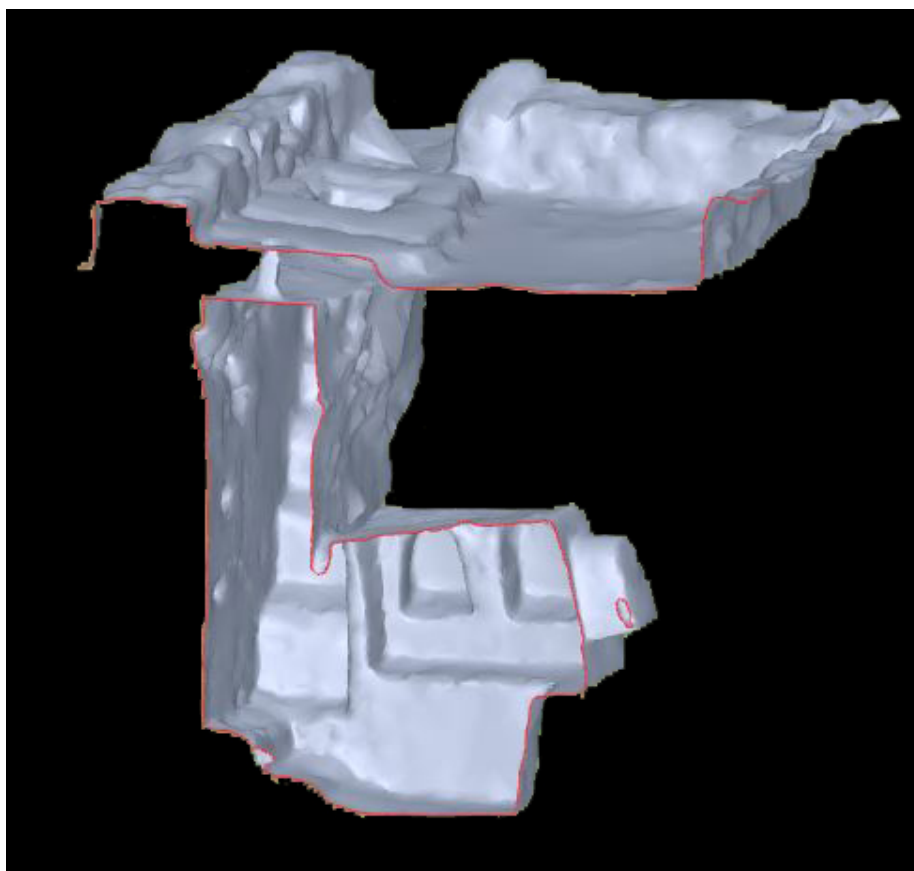


Figura 4.4: Sección de hipogea a partir de datos TLS. Autor: TCA Geomática, 2010.

Dentro de la estrategia programada por el Plan Director para el Conjunto Arqueológico de Carmona (CAC), la documentación ocupó un lugar preferente. Se pretendió integrar la información generada por 125 años de actividad arqueológica, con un levantamiento gráfico de las estructuras arqueológicas basadas en las nuevas tecnologías, especialmente el SIG y el escáner láser. El rigor, la exhaustividad, la precisión y la objetividad, estuvieron presentes durante todo el proyecto.

Los objetivos fijados en este proyecto fueron [49]:

- La conservación y salvaguarda.
- La investigación.
- La difusión: Dar a conocer y poner a disposición de todos los ciudadanos los valores del CAC fue otro de los retos. Fue desarrollado una aplicación web-SIG que pone a disposición de todos la información de las tumbas que hoy integran el CAC. Dicha difusión mediante visor web puede ser consultada en el siguiente enlace: <http://www.juntadeandalucia.es/cultura/museos/CAC/sicac/>

Son numerosos los proyectos que involucran el ámbito GIS y la documentación del patrimonio. No es alcance de esta investigación llegar a los límites del los sistemas de información. Exponemos el proyecto SICAC como idea base para la difusión del patrimonio.

En este sentido cabe destacar las conclusiones de otros autores que realizan metáforas surgidas a partir de un paralelismo con la extendida idea de la Web 2.0 (Internet concebido como una red de personas y no de máquinas). Se podría formular como la apuesta por construir el Patrimonio 2.0, entender que el patrimonio (en este caso, la arqueología) debe ser contemplado y gestionado no sólo como un conjunto de elementos materiales concretos, que son sin duda su parte esencial e irrenunciable, sino como un conjunto de significaciones y valores que asignamos y construimos sobre esos elementos materiales, y que son precisamente los que convierten sucesivamente en registro y en patrimonio a lo que de partida no son más que una serie de objetos que, eso sí, podemos (casi siempre) localizar y delimitar con bastante naturalidad en el espacio [70].



Figura 4.5: Distribución georreferenciada de tumbas en SICAC. Autor: Autor a partir de SICAC, 2016.

Un claro ejemplo de aplicación de esta metáfora la encontramos en textos de García Sanjuán [69] donde la finalidad de la georreferenciación es claramente orientada a los posteriores análisis de rutas óptimas y rutas de mínimo coste basadas en la pendiente.



Figura 4.6: Cálculo de rutas óptimas y de mínimo coste basadas en la pendiente con apoyo de SIG. Autor: L. Sanjuán, D. Wheatley, P. Murrieta Flores, and J. Márquez Pérez, 2009.

4.5. Epistemología y proyectos específicos de referencia

Reservamos este apartado para hacer mención especial a una serie de proyectos que tienen una estrecha relación con nuestra investigación. La relación directa de estas obras con nuestra investigación se basan en la unión entre bibliografía de carácter histórico sobre capiteles, bibliografía sobre tecnologías y metodologías de digitalización tridimensional, y bibliografía sobre sistemas de información geográfica.

El estudio de los capiteles en particular, y el de la decoración arquitectónica en general, es un campo un tanto descuidado en la Sevilla hispanomusulmana [50]. José Manuel Bermúdez Cano en su publicación “Capiteles Precalifales en el Palacio Mudéjar del Rey Don Pedro: tipos, talleres y reemplero” hace un estudio parcial sobre los capiteles reemplerados en el conocido como Palacio Mudéjar de los Reales Alcázares de Sevilla. En él, analiza los ejemplares hispanomusulmanes anteriores a la estandarización de las producciones califales partiendo de los datos proporcionados por el estudio de trece de estos capiteles. Expone algunas cuestiones generales sobre el origen y el reemplero de los capiteles de acarreo sevillanos. Esta obra, junto con otras del mismo autor, como “La transmisión de modelos Protobizantinos y Orientales en los capiteles de hojas angulares béticos” [9] o “Escultura decorativa Tardorromana y Altomedieval en la Península Ibérica” [7] son la base científica en lo que respecta al estudio de los capiteles del presente trabajo. En estas últimas obras de Bermúdez Cano se vuelve a poner de manifiesto la importancia del capitel y su capacidad de transmisión de información histórica.

En el ámbito de la aplicación de las tecnologías innovadoras a la arquitectura y arqueología, debemos nombrar la obra del Profesor de la Universidad de Sevilla

Dr. José Antonio Barrera Vera [6]. Aunque como podremos ver no es el único autor en este aspecto que aparece en el presente trabajo, si es decisiva su obra por su estudio por memorizado de los distintos recursos actuales (año 2006) en este ámbito y sobre sus aplicaciones. Esta obra establece una óptima base para su comprensión y una visión del estado de las tecnologías en el cual nos apoyamos. Por ello, su obra se convierte una base científica muy importante para el desarrollo de esta investigación. Cabe mencionar que ha sido necesaria una labor de actualización de las tecnologías que en su obra conocimos debido a su fecha de publicación.

Siguiendo en la misma línea, debemos hacer referencia al documento “Recomendaciones Técnicas para la Documentación Geométrica de Entidades Patrimoniales” [51] elaborado por el Centro de Documentación y Estudios del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico de la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía. Esta entidad de derecho público tiene como uno de sus principales fines “el análisis, estudio, desarrollo y difusión de teorías, métodos y técnicas aplicadas a la tutela del patrimonio histórico y a su protección, conservación, gestión, investigación y difusión” . Este es otro de los documentos que aportan gran base a nuestro trabajo de investigación. Por ello, seguiremos analizando conforme el desarrollo de los siguientes capítulos lo vaya requiriendo.

De igual modo se han realizado indagaciones bibliográficas sobre Bases de Datos Espaciales, donde el autor Martínez Llario con su obra “PostGIS 2: Análisis Espacial Avanzado” [52] ha sido de gran importancia. También sobre Sistemas de Información Geográfica, donde cabe resaltar una peculiaridad: debido a su continua evolución y desarrollo la carga bibliográfica se ha volcado sobre sitios web especializados en SIG. Serán especificados conforme lo requiera la redacción.

4.6. Conclusiones parciales del Estado de la Cuestión

El empleo de metodologías manuales o semi-manuales en los procesos fotogramétricos ha limitado el acercamiento de los procesos basados en imágenes (image-based) para el levantamiento tridimensional de objetos complejos. Entre las principales razones se encuentran la necesidad de un gran número de imágenes, la generación de puntos de comunes (tie points) de forma manual en todas aquellas y la necesidad de la pre-calibración de la cámara. Estos factores, junto con los parámetros propios derivados de la fotogrametría, han definido las sesiones fotográficas impidiendo realizar un trabajo fotográfico “libre”. Parámetros como las distancias de disparo, distancias bases o distancias focales fijas pre-calibradas, entre otros, han predeterminado y limitado las actuaciones en

campo de los técnicos. Son bien conocidas las ventajas de los levantamientos fotogramétricos por muy complejos que sean los elementos. Sin embargo, el recurso temporal siempre ha sido un factor en contra muy a tener en cuenta en los trabajos profesionales. Este escenario ha propiciado el empleo del escáner láser terrestre (TLS) durante los últimos años, especialmente en los casos de grandes y complejos levantamientos o de emergencia. Aunque la técnica requiere mayores presupuestos en cuanto a equipamiento, permite la reconstrucción en tiempo real. Algo muy valorado en determinados proyectos, por ejemplo, de emergencia.

Los recientes avances en automatización de los métodos basados en imágenes (automatic-image-based methods) están propiciando el efecto contrario al sucedido hace una década y descrito anteriormente: el empleo de métodos basados en imágenes está sustituyendo y/o complementando a los métodos de tiempo real mediante escáneres. La implementación de técnicas de visión computacional a la fotogrametría ha revolucionado la forma en que levantamos. Sin embargo, el software desarrollado a partir de este dueto no varía de forma significativa puesto que el flujo de trabajo sigue siendo similar con la particularidad de la automatización de procesos. Como consecuencia, tenemos una fase de orientación de imágenes completamente automatizada con la posibilidad de extraer densas nubes de puntos en 3D en un espacio de tiempo relativamente corto. El recurso temporal en esta metodología recae en su mayoría en cálculo computacional. Además, esta identificación masiva de puntos permite una alta observación redundante que, en general, conduce a soluciones de orientación de imágenes precisas y una auto-calibración simultánea de la/s cámara/s. Todo ello conlleva a la una fase de sesión fotográfica en campo mucho menos encorsetada y predefinida que años atrás:

- Es posible la gestión de diferentes cámaras en un mismo proceso.
- Si se requiere, es posible cambiar los parámetros de la cámara durante la sesión fotográfica, como la distancia focal.

Debemos ser conscientes de las consecuencias en términos de la precisión alcanzable. De hecho, las recomendaciones (desde los propios desarrolladores de software) no guardan esta línea de “total libertad” en la fase de adquisición. Algunas de las ventajas de dichas simplificaciones son:

- Libertad de movimiento alrededor del objeto durante la fase de adquisición.
- Adquisición a diversas escalas permitiendo la consecución de múltiples niveles de detalle en un mismo proceso.
- Levantamiento de objetos de difícil accesibilidad, posición o geometría.

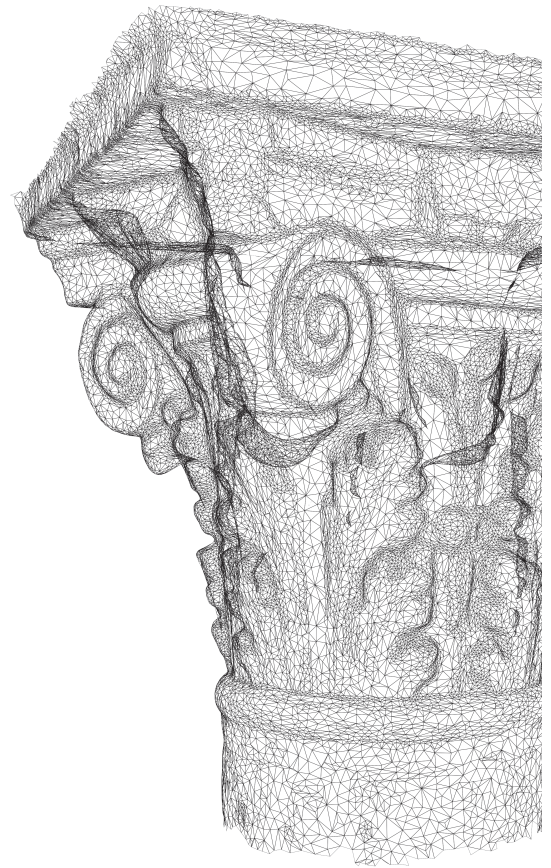
Por último, debemos resaltar que la automatización de determinados procesos fotogramétricos no significa la creación de sistemas autónomos. Si bien es cierto que existe una tendencia hacia la creación de sistemas autónomos con

resultados visuales aceptables (nos referimos a proyectos de levantamiento en servidores donde poco o nada puede ser controlado), éstos no podrán suplir la acción humana en levantamientos minuciosos y/o profesionales. Los técnicos especializados en levantamientos siguen jugando un papel esencial para el rigor y calidad dimensional de los productos generados.

Parte I

Digitalización 3D

Estudios previos



Capítulo 5

Estudios Previos

5.1. Líneas seguidas

Hasta la fecha no se han encontrado estudios exclusivos, en lo referente a los levantamientos, sobre los capiteles del Real Alcázar de Sevilla. Así mismo, no se ha detectado bibliografía específica sobre la especialización en los levantamientos de los capiteles en general, ya sea en ámbito local o internacional. Sin embargo, y durante el desarrollo de la investigación, hemos registrado actividades de levantamientos de capiteles por equipos de científicos en el norte de Italia, pero con técnicas distintas de las que nosotros aquí planteamos y tenemos a nuestro alcance. Además, son habituales los proyectos de levantamientos de pequeñas piezas arqueológicas que pudieran guardar ciertos grados de similitud en determinados procesos de la digitalización y el modelado tridimensional.

Este trabajo presenta dos protocolos para la realización de estudios geométricos de los capiteles en particular, y del patrimonio arquitectónico y arqueológico en general. Los modelos tridimensionales son obtenidos con técnicas de escaneado óptico de triangulación y fotogramétricas-SFM¹. Aunque son analizadas otras posibilidades de digitalización 3D (como el escáner láser terrestre). Además, esta bifurcación de caminos para intentar lograr un mismo destino y finalidad, nos permite hacer un estudio de comparación entre las técnicas. También se presenta el estudio previo realizado para la selección de las técnicas finalmente empleadas.

El uso de estas técnicas innovadoras aporta, entre otras ventajas, la oportu-

¹Structure From Motion

La metodología que aquí se presenta se deriva de aplicaciones a casos reales realizadas por el autor. De este modo las mejoras, ejemplos, fotos y demás datos vienen siempre referidos a estas experiencias reales realizadas ad hoc para la investigación y que han implicado la colaboración de cuatro universidades: Universidad de Sevilla, *University of Bradford*, *Università degli Studi di Salerno* y Universidad de Valladolid.

[illegible]

Figura 5.1: Anotaciones durante la fase de estudios previos sobre plano de fachada del Cenador de Carlos V, Real Alcázar de Sevilla. Fuente: Autor.

5.1.1. El aporte de las nuevas tecnologías

Estas tecnologías de captura y manipulación de información espacial aplicada al patrimonio arqueológico permiten la obtención de modelos tridimensionales de piezas reales. El propósito de la aplicación de estas técnicas es documentar y representar estos elementos, con las incuestionables ventajas que esto conlleva:

- Acceso al elemento de forma virtual.

- Mejora de precisión.
- Mejora de objetividad de los resultados.
- Mejora del nivel de detalle.
- Traspaso de información de forma digital.
- Disminuir la manipulación del objeto.
- Facilitar los trabajos de conservación.
- Perdurabilidad en el tiempo [17].

En cuanto al avance en los últimos años de las tecnologías empleadas en el presente proyecto ha quedado suficientemente justificado con la reseña bibliográfica presentada en capítulos anteriores.

5.1.2. Primeros pasos

Análisis de los recursos

Debíamos ser realistas desde el principio. Hacer una investigación de este tipo lleva aparejado disponer de unos recursos tecnológicos actuales (tanto en software como en hardware) y costosos en algunos casos, es por ello que se justifica este pequeño apartado antes de continuar con nuestro análisis de las técnicas.

No podemos negar que este ha sido uno más de los factores que han enmarcado nuestro trabajo. Aunque lo realmente ideal fuera disponer de todos los medios posibles, es un hecho imposible. Actualmente disponer de algunos de los aparatos que se han usado durante esta investigación supone una gran inversión económica. Algunos de ellos han sido adquiridos para la realización del presente proyecto, mientras otros son propiedad de universidades, concretamente de la *University of Bradford*, de la *Università degli Studi di Salerno* y de la Universidad de Sevilla. Desde los ordenadores con los recursos necesarios, hasta los escáneres, pasando por las cámaras SLR, objetivos, trípodes y software suman una cantidad inasumible para un investigador sin el apoyo necesario.

Aunque en el capítulo de agradecimientos se hará de forma más detallada, moralmente no podemos dejar pasar este apartado sin agradecer al *Division of Archaeological, Geographical and Environmental Sciences, University of Bradford*, al *Laboratorio Modelli, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Salerno* y al Departamento de Ingeniería Gráfica de la Universidad de Sevilla, sin los cuales no hubiese sido posible disponer de los recursos a los que este apartado se refiere.

A continuación se muestran las tablas de los recursos empleados:

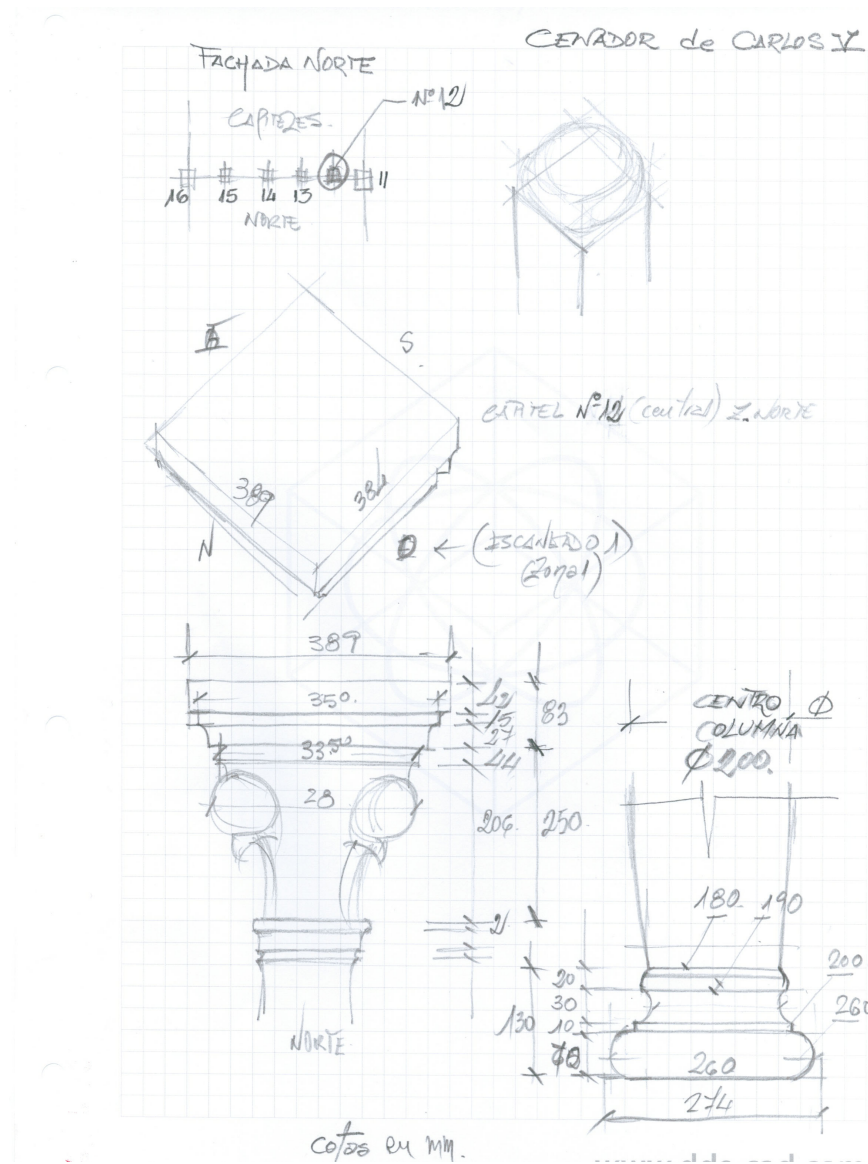


Figura 5.2: Anotaciones durante la fase de estudios previos del capitel seleccionado del Cenador de Carlos V, Real Alcázar de Sevilla. Fuente: Autor.

INSTRUMENTOS	PROPIEDAD
Leica ScanStation C10	Departamento de Ingeniería Gráfica
Leica TS Total Stations	Departamento de Ingeniería Gráfica
Artec MHT 3D	Departamento de Ingeniería Gráfica
Artec MH	Laboratorio Modelli
Faro 120 Photon	D. of Archaeological Sciences
Faro Arm Quantum	D. of Archaeological Sciences.
Faro Focus3D	Laboratorio Modelli

Tabla 5.1: Instrumentos empleados durante la investigación. Fuente: Autor.

SOFTWARE	PROPIEDAD
Artec Studio	Dpto. de Ingeniería Gráfica
PolyWorks	D. of Archaeological Sciences
Meshlab	Software libre
Agisoft (PhotoScan)	Laboratorio Modelli
Pointools Edit Pro y View	D. of Archaeological Sciences
Geomagic (Studio)	Adquirido por investigador (prueba)
ArcGIS (ArcMAP, ArcCatalog, ArcScene)	Universidad de Sevilla
QGis	Software libre
PostgreSQL/PostGIS	Software libre
Leaflet	Software libre

Tabla 5.2: Software empleado de la investigación. Fuente: Autor.

EQUIPOS AUXILIARES	PROPIEDAD
Máquina PC	Adquirido por investigador
Cámara Nikon D5100	Adquirido el investigador
Objetivo 18/55 mm - F/3.5-5.6	Adquirido por investigador
Trípode	Adquirido por investigador
Distanciómetro Láser	D. Ingeniería Gráfica
Calibre	Adquirido por el investigador

Tabla 5.3: Equipos auxiliares más relevantes empleados en la investigación. Fuente: Autor.

El problema de las sombras

Los trabajos de levantamientos van precedidos de un estudio pormenorizado de los estacionamientos necesarios y sus ubicaciones con la finalidad de evitar las denominadas zonas de sombras². Generalmente, el éxito en la resolución de este problema, así como el costo temporal de este estudio, está estrechamente relacionado con la experiencia del técnico encargado del levantamiento.

²Las zonas de sombra pueden ser definidas como el área de puntos perteneciente al elemento objeto de estudio que no pueden ser levantados debido a la interposición de obstáculos en la visual con la herramienta de levantamiento.

En este sentido, cabe destacar los trabajos de investigación en curso realizados por Elena Cabrera Revuelta y sus directores de tesis doctoral, Dr^a. M. José Chávez de Diego y Dr. J. A. Barrera. Dichos trabajos tratan de encontrar solución a los posicionamientos de los estacionamientos mediante el empleo de herramientas objetivas y automatizadas. La consecución de sus objetivos permitirá minimizar el costo temporal, resolverá problemas de sobre-estacionamientos o sub-estacionamientos, y minimizará el factor relacionado con la experiencia del técnico encargado del levantamiento. Aunque ya existen resultados parciales publicados en distintas reuniones científicas el grueso de su investigación permanece inédito por encontrarse la tesis en su última fase de desarrollo [68].

No existen diferencias en este aspecto entre las herramientas que empleemos para realizar los levantamientos. Ya sea una cámara fotográfica, una estación total o un escáner, las zonas de sombras deben ser resueltas con nuevos posicionamientos que permitan las visuales con aquellas áreas. Entrando a concretar nuestro caso, los capiteles provistos de voluminosos adornos dificultarán las tareas de levantamiento con el aumento de posicionamientos alrededor de estos. Sin embargo, tras las experiencias realizadas, podemos afirmar que solo en determinados casos los obstáculos visuales derivarán de terceros objetos. Un claro ejemplo puede observarse en la Figura 5.3, donde se aprecia una misma nube de puntos de un capitel³ desde distintos puntos de vista. La áreas de sombra son producidas por los adornos del propio elemento objeto de levantamiento.

La existencia de estas sombras sobre la captura de datos puede derivar en un detrimento de la calidad final del modelo 3D (a menudo algoritmos de interpolación de información tridimensional son usados para intentar minimizar las consecuencias negativas de visualización). Cabe preguntarnos, ¿cómo podemos estar seguro de capturar toda la información antes de abandonar las tareas de campo?

Esta pregunta puede tener dos respuestas, ambas relacionadas con la tecnología empleada en el levantamiento. Si trabajamos con equipos de escaneado, éstos nos muestran la información en tiempo real, por lo tanto con una rápida revisión y análisis en campo podemos verificar que no existen grandes zonas sin información del objeto digitalizado. Sin embargo, si el levantamiento es realizado con técnicas fotogramétricas, disponemos de las imágenes tomadas y no de la información tridimensional en sí, por lo que esta tarea se dificulta y por lo tanto será precisa una mayor atención en el estudio previo de posicionamientos de la cámara fotográfica.

Durante la realización de este proyecto se reservó una primera visita con el objeto exclusivo de estudiar la geometría del capitel, su entorno y hacer un estudio previo de las distintas posiciones o movimientos del escáner y la cámara en aras de minimizar al máximo el problema de las sombras (aunque el software existente nos permite interpolar puntos en las zonas menos pobladas, intentamos minimizar al máximo este aspecto). Para ello, se observó con minucioso detalle el elemento y aquellas zonas que eran susceptibles de crear problemas durante la fase de captura de datos. Posteriormente se tomaron una serie de fotografías con el objeto de planear en gabinete dichas posiciones y movimientos alrededor

³Capitel situado en Kirkgate Street en la ciudad de Bradford (Reino Unido).



Figura 5.3: Dos imágenes de la misma nube de puntos desde distintos ángulos, pertenecientes a un capitel de la ciudad de Bradford (UK): A) No se observan las zonas de sombras; B) Se observan los problemas derivados de las zonas de sombra arrojadas por los adornos propios del capitel. Fuente: Autor.

del capitel. Este estudio ha dado como resultado dos cotas diferenciadas de posicionamientos para la captura de datos: una de ellas a la cota del collarino y la otra a la cota de las volutas.

Como hemos mencionado, un claro ejemplo del problema de las sombras se observa en la Figura 5.3, donde las dos fotografías muestran desde distintos ángulos una misma nube de puntos obtenida de un mismo capitel. Este es un claro caso de falta de información en zonas de sombra que el propio elemento lanza sobre sí mismo. Su solución no es otra que volver a desplazarse allí donde el objeto se encuentra (Bradford, Reino Unido, a 1.950 km de Sevilla) y tomar datos desde cotas mayores. Queda por tanto justificada la importancia del estudio previo de la geometría para evitar este tipo de problemas.

5.1.3. Evaluación de adecuación de técnicas

Las técnicas aquí evaluadas son empleadas para la captura con precisión de datos tridimensionales y obtención de información *as-built*. Dicho proceso de captura de información permite llevar la escena escaneada o fotografiada al dominio digital para su posterior tratamiento mediante software específico. Una vez en este dominio podemos ver, medir, seccionar, evaluar e interactuar totalmente con la escena sin necesidad de estar en el entorno original.

Todas las técnicas aquí evaluadas permiten la obtención de coordenadas X, Y, Z, e información R, G, B de puntos en el espacio, con mayor o menor densidad y precisión, y de forma directa o indirecta. Generalizando, estos puntos formarán las llamadas nubes de puntos. Si lo comparamos con una fotografía digital, podemos decir que dichos puntos son los píxeles que la forman, pero además con información de posición 3D (coordenadas X, Y, Z). Si bien el objetivo final pudiera ser la obtención de estas nubes de puntos, a menudo estas son solo un medio para llegar a la solución. De hecho, así las planteamos en la investigación.

Equipos de escaneo láser 3D

Comúnmente denominado como “TLS”⁴, algunos autores lo mencionan como “la topografía High-Definition”. El láser escáner es la técnica de captura más extendida actualmente dentro del registro del patrimonio arquitectónico y arqueológico [6]. Consiste en la obtención de una nube de puntos de gran densidad en un espacio de tiempo reducido. La obtención de dicha nube de puntos se realiza desde el punto de vista de la situación del escáner. Cuando hablamos de capturar objetos tridimensionales es necesario realizar varios estacionamientos que darán como resultado varias nubes de puntos. Con varias tomas del objeto con posicionamientos de distintos ángulos es posible obtener el modelo tridimensional completo.

Los instrumentos de medición láser se clasifican en cuanto a su tecnología en dos metodologías [53]:

⁴Terrestrial Laser Scanner

- Instrumentos de triangulación: tienen un sistema de emisión y otro de recepción separados a una distancia conocida y minuciosamente calibrada. Analiza la detección y se obtiene la distancia a la que se encuentra el punto. Son utilizados para distancias de hasta 20 veces la longitud de su base.
- Instrumentos de medición directa: al igual que el anterior están provistos de un sistema de emisión y detección, pero evalúan la distancia en base al tiempo de vuelo de la señal o al desfase producido comparando la onda recibida con la onda emitida. Han evolucionado enormemente y amplían su clasificación dependiendo de la técnica utilizada para el análisis de comparación entre la señal emitida y la recibida:
 - Time-Of-Fly⁵ (tiempo de vuelo): el láser es emitido y tras reflejarse en el objeto regresa una porción de la energía emitida al receptor. El tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción es calculado con precisión y, como consecuencia, la distancia al punto. Es utilizado en grandes distancias.
 - Phased-Shift⁶ (diferencia de fase): una onda sinusoidal continua es emitida. Tras reflejarse en el objeto, es recibida por el receptor para obtener una comparación de la diferencia de fase entre ambas. Estos equipos suelen ser de menor alcance y mayor precisión.

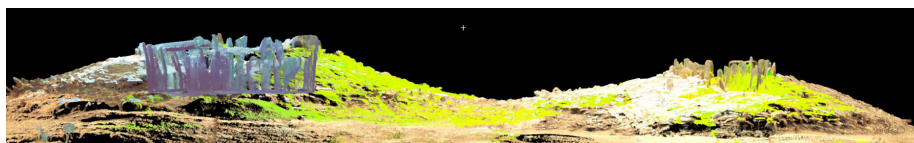


Figura 5.4: Orto-alzado oeste del conjunto dolménico El Pozuelo (Huelva). Nube de puntos obtenida con Leica ScanStation C10 (TOF). Fuente: Congreso Arqueológico 2.0 (2012). Cota Cero S.L. y Barrera Vera, J.A.

No es objeto del presente trabajo hacer una profunda clasificación de los tipos existentes o de las características de funcionamiento de estos aparatos, ya que existe numerosa bibliografía al respecto⁷. Pero si es importante mencionar esta primera clasificación debido a la particularidad y las características de los elementos a los que este proyecto se dirige: siempre utilizaremos técnicas sin contacto directo que eviten dañar los elementos o alterarlos de forma alguna.

ScanStation C10 El primero de ellos ha sido el Leica ScanStation C10, perteneciente al Departamento de Ingeniería Gráfica de la Universidad de Sevilla. Una de sus principales características es su sistema de medición Time-Of-Fly⁸

⁵TOF

⁶PS

⁷Existe numerosa documentación bibliográfica relativa a los tipos de láser empleados: [2], [6], [51], [53]

⁸Tiempo de vuelo. También llamado *time delay*. Su tecnología de medición electro-magnética de distancias está basada en el cálculo de la distancia recorrida a partir del tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de una señal emitida hasta que vuelve después de reflejarse en el punto a medir [6].

utilizado para establecer las coordenadas de cada punto en el espacio⁹.

No cabe duda que disponer de esta tecnología de vanguardia es un privilegio para cualquier profesional o investigador, pero si recapitulamos, líneas anteriores establecimos unas pautas de mejora en los procesos de captura, tiempos y, por supuesto, viabilidad de recursos.

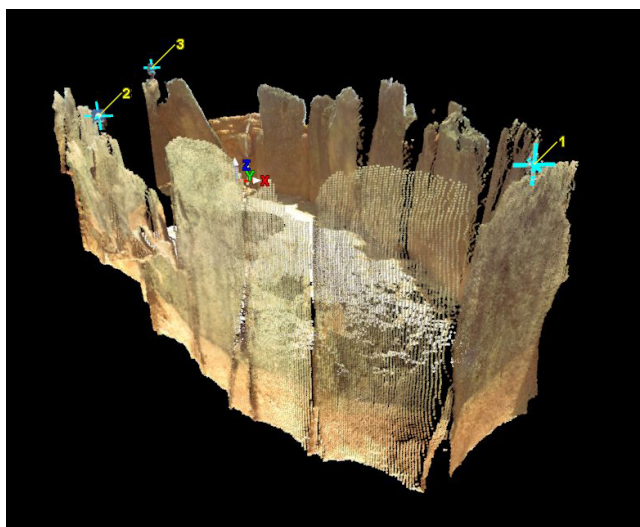


Figura 5.5: Nube de puntos obtenida con Leica ScanStation C10 (TOF). Conjunto dolménico El Pozuelo (Huelva). Fuente: Congreso Arqueológica 2.0 (2012). Cota Cero S.L. y Barrera Vera, J.A.

De este modo, los mayores problemas vendrían derivados de las zonas de sombra que el propio capitel nos impondría debido a sus adornos florales (o de otra índole dependiendo de su procedencia histórica) que le caracterizan. Este problema es de fácil solución con el simple estacionamiento del escáner desde distintos ángulos de vista hacia el capitel. Y precisamente aquí radica el principal inconveniente: ya nos hacemos a la idea de que debemos estacionar varias veces el escáner para cubrir dichas sombras, algo que no es demasiado trabajoso a nivel del terreno y el consumo de tiempo es asumible conociendo que los resultados que obtendríamos con estos aparatos serían de gran calidad y precisión. Pero si a esto le sumamos el capitel se encuentra a una altura de 2.05 metros sobre el terreno, y que para evitar dichas sombras hay que estacionar a cotas superiores que nuestro trípode nos permite, esto implica que los procesos, tiempos de trabajo y los recursos necesarios se ven gravemente dañados. Además, hemos empleado capiteles de pequeño tamaño (aproximadamente 300 x 300 mm), por lo que el uso de estos equipos queda totalmente fuera de lugar.

Por lo tanto, a modo de síntesis podemos establecer los siguientes puntos:

1. Excelente calidad de los resultados, cumplirían los objetivos marcados en esta cuestión.

⁹Más información sobre las características del modelo: <http://www.leica-geosystems.es/>

2. Procesos, tiempos de trabajo y recursos necesarios se alejan de lo que realmente vamos buscando (por las características del capitel en cuestión).
3. No son los equipos fabricados para el levantamiento detallado de pequeños objetos.

Laser Scanner Photon 120/20 Hemos tenido la oportunidad de evaluar el Faro Laser Scanner Photon 120/20, perteneciente a la Universidad de Bradford. Este escáner láser es de similares características al escáner Leica evaluado en el punto anterior en cuanto a procesos de trabajo y sistema de medición empleado¹⁰(time-of-fly). Por ello, desde un primer momento supimos que no se adaptaría a las pautas marcadas por nuestros objetivos. Todo lo descrito anteriormente en cuanto a procesos de captura y recursos necesarios son extrapolables a este nuevo escáner.

Las pruebas realizadas sobre objetos arqueológicos desvelaron dos aspectos que perjudicarían al proceso de trabajo de nuestro futuro proyecto. En primer lugar, se detectó una gran producción de puntos de ruido¹¹ que dificultan la interpretación del objeto. Este ruido se acentuaba cuando se trabajaba a grandes resoluciones. Aunque cabe mencionar que los resultados mostrados mejoraban tras una primera “limpieza” en el software propietario Faro Scene.

En segundo lugar, las texturas no eran asignadas de forma precisa por el sistema. Es decir, el sistema encargado de asignar la información RGB¹² a cada punto presenta un pequeño desfase con respecto al sistema de captura de coordenadas XYZ. Tras varias pruebas y estudios llegamos a la conclusión de que este fallo de precisión era debido al propio método mecánico de trabajo del aparato. Este método requiere de una estructura adicional donde se ubica la cámara fotográfica para la captura de texturas. Al escanear con color es necesario bajar y subir el trípode de forma manual para colocar el punto central de la cámara en la misma posición que el modulo de emisión del rayo láser del escáner, por lo que unos milímetros de error nos produce un desfase durante el giro del equipo y el consiguiente problema en la asignación de texturas a los puntos.

En la Figura 5.6 podemos observar el Faro Laser Scanner Photon 120/20 en posición de escaneo, donde la columna del trípode se encuentra en su máxima altura y la cámara desviada de la posición central gracias al movimiento de estructura acoplada. En posición de registro de texturas la cámara debe situarse en la posición central (justo encima del espejo giratorio) y la columna del trípode en su mínima altura.

Por lo tanto, a modo de síntesis podemos establecer los siguientes puntos:

¹⁰El proceso de medición comienza en la unidad de láser encargada de la emisión del rayo. A través de un espejo giratorio el rayo láser es direccionado hacia el objetivo. La distancia es determinada gracias a los procesos de reflexión del rayo. Las coordenadas en el espacio del punto de medición son almacenadas. Este proceso es repetido miles de veces por segundo, dependiendo de la resolución y calidad deseada.

¹¹Se denomina ruido (en esta y otras disciplinas) a aquella señal no deseada que perjudica la calidad de la señal objetivo [15].

¹²Red, Green, Blue.



Figura 5.6: Faro Laser Scanner Photon 120/20 y cámara Nikon D300 en posición de escaneo. Fuente: Autor.

1. Se hereda información del estudio al escáner Leica ScanStation.
2. Además, las pruebas realizadas a grandes resoluciones desvelan una gran producción de ruido y pequeños fallos en el mapeo de texturas.

Arm Quantum El siguiente de esta sección es el escáner Faro Arm Quantum que la *University of Bradford* (Reino Unido) puso a nuestra disposición. Esta dentro de la sección de los láser escáner, pero podemos decir que las diferencias con respecto a los anteriores aquí presentados son de gran calado. Se trata de un escáner de triangulación que basa su tecnología en sistemas de captación de deformación de la luz estructurada. Es decir, los sensores captan la deformación que se produce en el rayo láser cuando este entra en contacto con la geometría del elemento. El escáner Faro Arm Quantum recoge la información geométrica, pero no la información RGB por lo que las texturas tienen que ser asignadas en un proceso adicional.

Además, se trata de un sistema estacionario, lo que dificulta sobremanera el proceso para la finalidad buscada en el presente proyecto. Por ello, debemos decir que esta tecnología no cumple los requisitos marcados puesto que el capitel de estudio forma ya parte de un conjunto arquitectónico y no puede ser desplazado a laboratorio. Sin embargo, los resultados obtenidos en los laboratorios de *University of Bradford* con otro tipo de elementos arqueológicos han sido sobresalientes. Llegando a precisiones de 0,027 mm sobre los elementos escaneados.

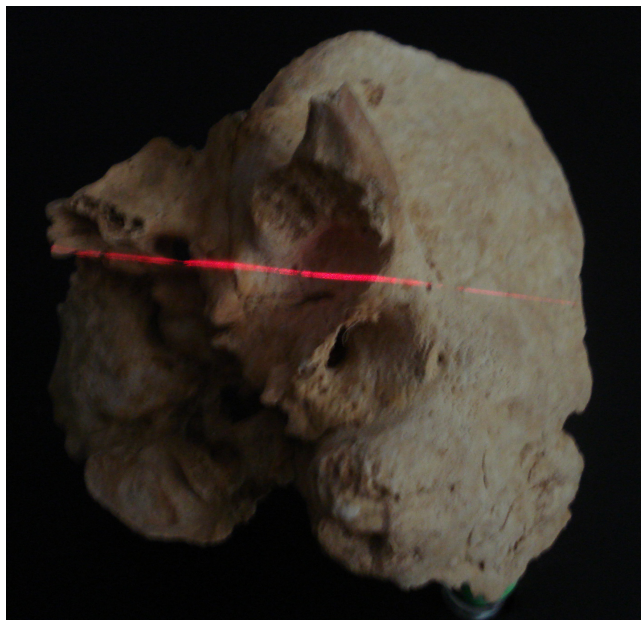


Figura 5.7: Deformación de la línea láser del Faro Arm Quantum sobre el objeto arqueológico. Fuente: Autor.

A continuación describiremos el proceso de trabajo seguido de forma muy

breve, debido a que no podrá ser una de las técnicas a emplear (por las características intrínsecas de la técnica y las particularidades de nuestro proyecto). Pero sí es de gran importancia conocer este proceso, ya que no descartamos su empleo en futuros trabajos durante la ampliación de este proyecto¹³.

En primer lugar se estableció un lugar de apoyo lo más estable posible para la estructura del escáner. Este equipo viene provisto de un robusto trípode que, aunque no es fácil su transporte debido a su peso y volumen, permite su estacionamiento de forma firme sobre un gran número de superficies. De igual modo, el elemento que deseamos escanear debe estar sobre una superficie rígida e inmóvil y, a su vez, debemos impedir cualquier mínimo movimiento del objeto durante el proceso de toma de datos. Este último es un aspecto capital que requiere el máximo cuidado ya que se ha trabajado entre 30 y 70 mm de la pieza. En este caso, se decidió ubicar el escáner sobre una robusta plataforma de trabajo que a su vez serviría para establecer las escenas de escaneo con los elementos arqueológicos.

El siguiente paso es la calibración del escáner: es un proceso donde han sido calibrados los sensores de movimiento y el sensor de recepción del láser. Se realiza de forma semiautomática con la ayuda de dispositivos de calibración ubicados sobre la plataforma de trabajo.

Una vez calibrado el escáner, se procede a colocar el objeto sobre el escenario de trabajo. Tras escanear toda aquella zona del objeto que queda vista se procede al movimiento de este de forma manual para cubrir toda la superficie. Aquí se observa una de las grandes diferencias entre los sistemas de escaneado que mencionamos en líneas anteriores. Quedó claro que para la formación del modelo tridimensional del objeto necesitamos escanearlo de todas sus partes. Con este sistema, el movimiento lo realiza el elemento escaneado, y no el escáner. Es uno de los inconvenientes frente a otros sistemas: mayor manipulación del elemento arqueológico.

Por último, con la nube de puntos obtenida y ejecutados los algoritmos necesarios de alineamiento, refinado, etc...¹⁴, podemos proceder al mapeado de texturas. Para ello, se ha empleado una cámara réflex Nikon D300s + objetivo AF-S DX Nikkor 35mm f/1.8G.

Por lo tanto, a modo de síntesis podemos establecer los siguientes puntos:

1. Excelente calidad de los resultados, cumplirían los objetivos marcados en esta cuestión.
2. Basado en sistema estacionario que dificulta los procesos, tiempos de trabajo y recursos necesarios.
3. Mayor manipulación del elemento arquitectónico.

¹³En el Capítulo "Consideraciones finales y conclusiones" damos a conocer las líneas generales futuras que planteamos.

¹⁴No entramos en más profundidad por ahora. Sí lo haremos en las técnicas finalmente seleccionadas para la realización del modelo del capitel. Recordamos que se hace una breve explicación de los procesos con el Faro Arm Quantum porque se prevé su nuevo análisis a la adecuación de los trabajos en un futuro próximo.

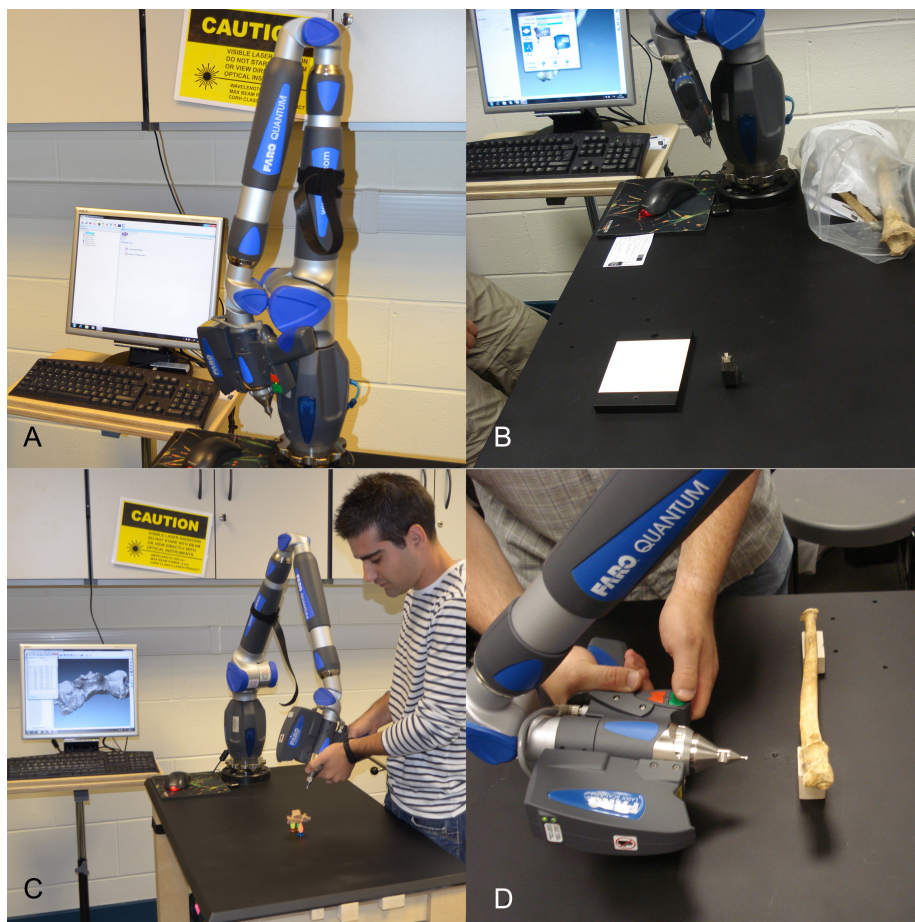


Figura 5.8: A) Faro Arm Quantum; B) Dispositivos de ayuda a la calibración; C) Proceso de escaneo de pequeña pieza arqueológica; D) Distancia de escaneo. Fuente: Autor.

4. Se desestima el uso del Faro Arm Quantum en esta primera fase de la investigación. Dejando abierto volver a plantearnos en un futuro su inclusión con piezas que ya no formen parte del conjunto arquitectónico.

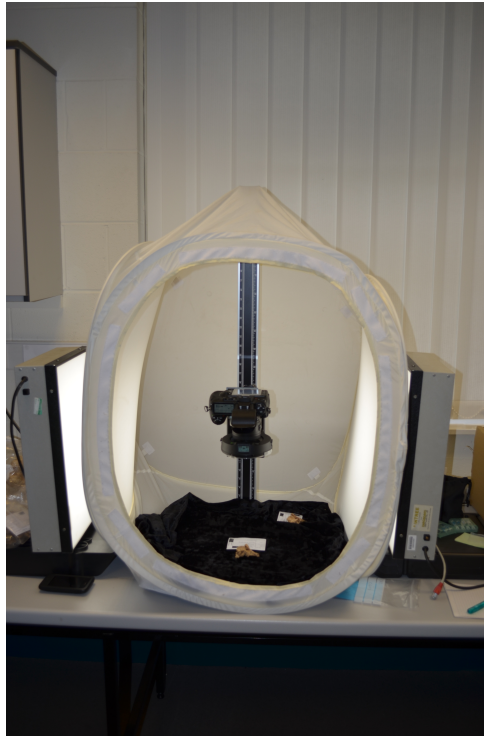


Figura 5.9: Dispositivo para la realización de las tomas fotográficas en la fase de texturizado. Fuente: Autor.

Escáner óptico de triangulación

MH y MHT 3D En las siguientes líneas evaluaremos el uso del escáner óptico. Este equipo, a diferencia de los escáneres láser, basa su funcionamiento en sensores de imagen. El escáner utilizado en este proyecto ha sido el Artec MHT 3D¹⁵. Además, se han realizado otras pruebas con el modelo Artec MH.

No ha sido fácil el manejo de esta tecnología: han existido problemas durante el proceso del registro de información. Los problemas venían derivados del manejo del propio equipo (velocidad de movimiento del mismo y ruidos producidos en las nubes de puntos derivados de dichos movimientos y reflectividad de las superficies escaneadas). Tras dejar constancia de estas dificultades, debemos decir que finalmente estos parámetros han sido controlados, mostrando algunos de los resultados a continuación.

¹⁵Más información del escáner será detallada en posteriores capítulos. Ha sido una de las técnicas seleccionadas para la puesta en práctica de la digitalización del capitel.



Figura 5.10: Nube de puntos con información RGB obtenida con Artec MHT 3D. Yasería de la fachada norte del Cenador de Carlos V, Real Alcázar de Sevilla. Fuente: Autor.

En la Figura 5.10 podemos observar una de las nubes de puntos obtenidas en unos de los escaneados pertenecientes a los estudios previos. Es importante resaltar que solo se trata de coordenadas de tres términos con información RGB, por lo que es posible conseguir nubes de puntos de grandes densidades. En este caso en particular se tratan de 4.312.860 puntos para 400mm² de yesería, por lo que aproximadamente obtuvimos 10.700 puntos por mm². Esta técnica nos permitirá obtener grandes detalles de los deterioros de los capiteles con grandes precisiones, que más adelante detallaremos.

Técnicas fotogramétricas/Structure-From-Motion

La fotogrametría es la disciplina que nos permite la creación de modelos 3D partiendo del registro de imágenes en 2D. Se basa en relaciones matemáticas establecidas en la geometría proyectiva¹⁶. Esta técnica nos permitirá construir un modelo tridimensional sin que exista contacto alguno con el capitel en el proceso de registro, ya que las imágenes del mismo son tomadas a través de medios fotográficos convencionales.

Por las características de nuestro proyecto nos centraremos en la fotogrametría de objeto cercano o de corto alcance. Es muy común el uso de esta técnica para resolver problemas singulares y muy específicos¹⁷. Esta tecnología nos permitirá realizar la transformación de proyección central (de la lente) a proyección ortogonal del modelo 3D¹⁸.

Un profundo estudio de la técnica nos ha permitido conocer que el factor determinante de su utilización sería el proceso de toma de datos. También podemos decir que los equipos empleados influirán de forma relevante¹⁹. De este modo se conforma el siguiente listado sobre el que finalmente tomar una decisión:

- Las precisiones alcanzadas por la técnica dependen de los factores mencionados. Los estudios y pruebas previas revelan grandes precisiones controlando dichos factores. De igual modo, existe numerosa bibliografía que respalda el uso de la fotogrametría de objeto cercano.
- El costo que producirá (en comparación con las otras técnicas aquí estudiadas) es reducido. Los equipos a emplear serán: cámara fotográfica y herramienta de medida (para el trabajo desarrollado en campo), y software fotogramétrico (para el trabajo de gabinete).
- Los tiempos empleados en el trabajo de campo se verán ampliamente reducidos, limitándose a establecer unos puntos de control y la realización de las fotografías. Sin embargo, los tiempos del trabajo de gabinete aumentan.

¹⁶Un amplio estudio de la fotogrametría se puede encontrar en [54]

¹⁷Algunos autores llegan a mencionar que la fotogrametría de objeto cercano permite obtener soluciones *a medida* del problema a resolver por su capacidad de adaptación a los requisitos de los proyectos.

¹⁸Más información sobre las principales características de esta metodología se puede encontrar en Atkinson 2009 [55]

¹⁹Las últimas actualizaciones de software requieren de equipos informáticos potentes.



Figura 5.11: Ortoproyección del modelo 3D de la yesería de la fachada norte del Cenador de Carlos V del Real Alcázar de Sevilla obtenida a partir de técnicas fotogramétricas. Fuente: Autor.

- Los recursos necesarios en campo disminuyen, por lo que nos permitirá mayor flexibilidad y agilidad.
- La información de las texturas es recogida por el propio proceso de trabajo. Posteriormente, el proceso de texturizado del modelo se realiza en gabinete a partir de las fotografías tomadas.
- La flexibilidad de la técnica permitirá ajustar los trabajos a la escala del capitel. De igual modo, la resolución final del modelo también puede ser ajustada a las necesidades del proyecto.
- En el caso de existir vegetación o cualquier otro elemento que nos impida fotografiar el capitel será imposible la construcción del modelo tridimensional. Tras una primera visita nos cercioramos que en nuestro caso de estudio el capitel tiene el suficiente espacio de trabajo libre a su alrededor para fotografiarlo con la lente seleccionada²⁰.

Como podemos ver la fotogrametría de objeto cercano se presenta una técnica flexible que, a nuestro juicio y tras las pruebas realizadas, permitirá ver interesantes métodos y resultados sin la necesidad de adquirir un escáner. Esta técnica será aplicada con mayor profundidad al caso de estudio presentado en capítulos posteriores.

5.1.4. Conclusiones de la evaluación de técnicas

Por todo lo expuesto lo expuesto a lo largo de este capítulo, las técnicas cuyas características se ajustan en mayor medida para la consecución de nuestro objetivo son:

- Fotogrametría de objeto cercano.
- Escáner óptico de triangulación.

Una vez llegados a este punto cerramos el apartado de estudios previos y nos centramos en las técnicas mencionadas y su aplicación práctica a nuestro caso de estudio: los capiteles.

²⁰Se podrán ver todos los detalles en posteriores capítulos, ya que es una de las técnicas seleccionadas.

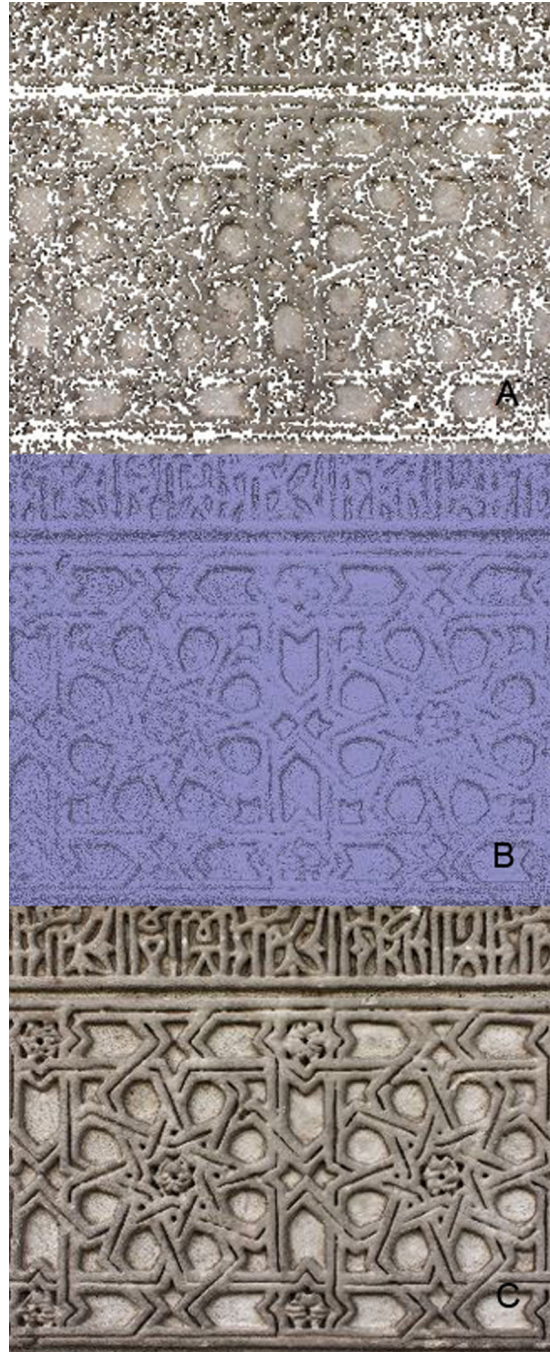


Figura 5.12: Yesería de la fachada norte del Cenador de Carlos V, Real Alcázar de Sevilla. A) Nube de puntos; B) Triangulación para la obtención de superficies; C) Superficies texturizadas. Fuente: Autor.

5.2. Primeros levantamientos

Tras haber realizado un estudio de las técnicas disponibles para la realización de nuestro proyecto y la consecución de nuestros objetivos, a continuación presentamos dos propuestas de protocolos para la digitalización tridimensional de capiteles. Estas propuestas han sido aplicadas de forma práctica para evaluar su adecuación a los trabajos.

5.2.1. Capitel del Cenador de Carlos V. Real Alcázar de Sevilla

El presente apartado presenta los trabajos llevados a cabo para la documentación gráfica, con carácter métrico, de capiteles mediante el empleo de técnicas fotogramétricas y de escaneado óptico de triangulación 3D.

Gracias a los avances producidos en las técnicas fotogramétricas y de escaneado, en gran parte debido a los imparables progresos tecnológicos, han florecido nuevas aplicaciones. Estos avances han propiciado la incorporación de nuevos métodos y estudios al ámbito de la arquitectura, la arqueología y el patrimonio. La documentación gráfica mediante estas tecnologías se expande y son varios los investigadores españoles que se encuentran en primera línea, además de investigadores internacionales, lo que nos indica que no solo es un campo que interesa en el viejo continente (en el caso de Italia se observa un gran interés, quizás influenciado por su rico legado patrimonial).

Por ello, hoy en día existe una gran variedad de métodos, desde los más clásicos a nivel manual (que aún no han llegado a perderse, ni pensamos que deban hacerlo) hasta las técnicas más avanzadas en fotogrametría y escaneado. En este escenario podemos imaginar la dificultad que implica a los gestores del patrimonio (ya sean técnicos relacionados con la arquitectura, arqueología, topografía, restauración, historia,...) escoger los métodos más adecuados para sus proyectos.

Por otro lado, y ahora centrándonos en nuestro caso de estudio, la huella que las distintas civilizaciones han ido dejando en la arquitectura de Sevilla puede ponerse de manifiesto mediante el estudio de uno de los elementos más representativos de las distintas corrientes arquitectónicas: los capiteles. Son numerosos los estudios que se hacen eco de la nutrida muestra que disponemos en Sevilla y de su importancia desde el punto de vista histórico, arqueológico y arquitectónico [50].

En este proyecto se ha realizado el modelo tridimensional de uno de los capiteles del Cenador de Carlos V mediante técnicas fotogramétricas y escaneado de triangulación óptico. El Cenador de Carlos V, tradicionalmente llamado Cenador de la Alcoba, se encuentra dentro del recinto del Real Alcázar de Sevilla. Fue construido en honor a Isabel de Portugal y Carlos V, transformándose una antigua construcción musulmana que tenía la misma estructura. Estas obras de remodelación tuvieron lugar entre 1543 y 1546, siendo Juan Hernández su



Figura 5.13: Capitel seleccionado para la puesta en práctica de la investigación. Exposición suroeste. Fuente: Autor.

director²¹. Mezcla elementos renacentistas con otros de herencia mudéjar, como los azulejos realizados por Diego y Juan Pulido.

Nuestro elemento de estudio, los capiteles, se encuentran en la galería exterior que rodea a todo el edificio. Estos son de origen genovés. En la figura se expone alzado, planta y sección del edificio con indicación del capitel seleccionado en el presente proyecto (marcado en rojo), situado en la fachada norte. El edificio cuenta con un total de 20 columnas y capiteles, todos ellos con diferencias en su geometría. La selección del elemento se realizó por su especial deterioro, alterándose la geometría original por la rotura de pequeños adornos en la flor del ábaco y volutas.

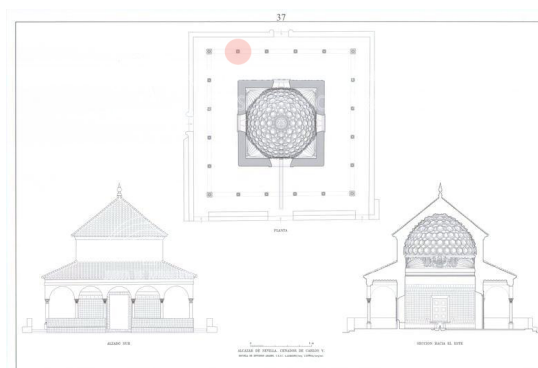


Figura 5.14: Documentación gráfica del Cenador de Carlos V con selección del capitel objeto de estudio. Fuente: Patronato de la Alhambra y Generalife, 2000.

5.2.2. Propuestas de protocolos

Protocolo para el escáner de triangulación óptico

En los siguientes apartados describimos de forma detallada los procesos seguidos para el levantamiento del capitel mediante escáner de triangulación.

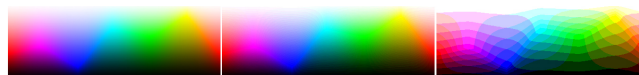


Figura 5.15: Profundidad de color (de izquierda a derecha): 24 BPP, 16 BPP y 8 BPP. Fuente: Autor.

Toma de datos En primer lugar, se ha empleado un láser óptico de alta resolución capaz de recoger información de las texturas del elemento con una cámara incorporada de 1,3 Megapixels y una profundidad de color de 24 BPP²²,

²¹El aspecto que hoy presenta corresponde a la remodelación llevada a cabo entre 1543 y 1546, como una de las primeras actuaciones que se ejecutaron con objeto de convertir los antiguos huertos musulmanes en jardines renacentistas.

²²Bits Per Pixel

lo que nos permite disponer de 16.777.216 colores, denominado *True Color*. Esto se convierte en un dato de importancia cuando hablamos de este tipo de proyectos, ya que la información que las texturas pueden aportar al resultado final obtenido del modelo 3D digitalizado es crucial [56]. En este proyecto el modelo empleado ha sido el Escáner Artec MHT 3D²³. A diferencia de los escáner láser empleados en numerosos trabajos de documentación gráfica²⁴, esta herramienta trabaja con una fuente de luz tipo flash (sin láser), por lo que se pudo capturar información con tiempos de exposición del sensor inferiores a la milésima de segundo. Dicho equipo se muestra en la Figura 5.16.



Figura 5.16: Toma de datos con el escáner Artec MHT y equipo informático portátil. Fuente: Autor.

Podemos ya avanzar unos de los principales inconvenientes de este sistema: escanear este tipo de elementos requiere el desplazamiento de todo el equipo

²³www.artec-group.com.

²⁴El empleo de los escáneres láser en la documentación geométrica del patrimonio ha evolucionado asombrosamente en la última década. Sin embargo, recopilando algunos de esos trabajos se observa como no ha logrado desplazar de este campo a las técnicas fotogramétricas, entre otros motivos, por la inversión que requiere adquirir un equipo de escaneo 3D y el conocimiento que requiere su manejo. Por el contrario, las técnicas fotogramétricas han evolucionado hacia la automatización de su software y los recursos necesarios no requieren gran inversión, aunque de ello pueda depender la calidad del resultado final. Aplicaciones de estas técnicas vemos en trabajos como: [6], [25], [48], [58]–[61].

al lugar donde éste se encuentre. Además, el escáner de triangulación óptico necesita el apoyo de un equipo informático y conexión a la red eléctrica, distanciándose la toma más cercana 25,50 metros del capitel y haciendo necesario material auxiliar para realizar dicha conexión. Pero, no siempre es posible de disponer de conexión a la red eléctrica en los trabajos de campo. Sin embargo, a fecha de hoy, existen modelos de este mismo escáner con baterías incorporadas.



Figura 5.17: Medidor de rango utilizado con ayuda del software Artec Studio v8. Fuente: Autor.

Una vez situados en la zona de trabajo con las herramientas y medios auxiliares a punto, el escaneado ha sido realizado a una profundidad de campo comprendida entre 0,4 m y 1 m, como rango ideal, disponiendo los sensores del equipo lo más paralelo posible²⁵ a la superficie del capitel a lo largo de su recorrido a través de esta. Estos parámetros son esenciales para la calidad del escaneado y la máxima reducción de puntos de ruido en el proceso de toma de datos. Para situar la escalera portátil a la distancia adecuada nos ayudamos de un distanciómetro láser. Este primer acercamiento es orientativo, puesto que las distancias ideales, anteriormente mencionadas, han sido controladas mediante el medidor de rango que el propio software proporciona.

En relación a la velocidad de movimiento del escáner sobre la superficie del capitel, ésta debe ir en concordancia con la velocidad a la que se configura la toma de fotogramas. En este proyecto, tras varias pruebas in situ, se ha establecido la velocidad a 14 fps²⁶. Este ajuste ha sido condicionado por los medios auxiliares disponibles y la factible división del proceso en cuatro zonas bien diferenciadas: cada una de las orientaciones del capitel. Primero, se ha realizado la zona orientada al oeste y, posteriormente, cada una de las orientaciones en sentido sur-este-norte. El posterior trabajo de post-proceso de datos nos permitiría fusionar estas divisiones requeridas en la toma de datos.

²⁵Debemos aclarar que el movimiento del escáner es totalmente manual

²⁶Fotogramas por segundo.

Procesado de datos Una vez ha sido finalizada la fase de escaneado del objeto, desde todos los ángulos mencionados, se ha de proceder a la construcción del modelo 3D. Este proceso incluye los siguientes pasos:

1. Importación de información al sistema.

Hemos incluido la importación en este sub-apartado para cubrir las distintas necesidades que puedan surgir dependiendo del software utilizado. En nuestro caso, la información escaneada queda registrada a través del software propietario Artec Studio v8. Los frames o fotogramas registrados son organizados en escaneos independientes, con el mismo sistemas de coordenadas, pero con distintos posicionamientos independientes y sin ningún tipo de “enlace” entre ellos. Es decir, los frames de cada escaneo guardan relación dentro de un mismo sistemas de coordenadas (aunque estos pueden, y deben en algunos casos²⁷, ser ajustados a posteriori. Mientras que cada uno de los escaneos, formados por frames, son totalmente independientes. Con esta puntualización, queda claro que unos de los siguientes pasos será la alineación de los distintos escaneos.

Por otro lado, la velocidad de escaneo debe permitir el correcto acople de los distintos fotogramas durante el proceso de escaneado. Las características geométricas de las áreas acopladas son utilizadas de forma automática por el software para alinear los fotogramas colindantes. En nuestro caso nos encontramos con una geometría idónea para este proceso, pero no siempre es así²⁸. Como resultado, obtenemos los fotogramas alineados en distintos escaneos. En nuestro caso, la información es mostrada en modo de TIN (Triangulated Irregular Network). Pero, dependiendo del software empleado, podemos visualizar la nube de puntos en primer lugar, que sería la información base sobre la cual se construye la TIN.

En un primer estudio de la geometría del capitel se ha establecido tres escaneos a distintos ángulos por cada orientación del elemento arquitectónico, evitando la aparición de zonas de sombra. Este número de escaneos se ha visto modificado en dos ocasiones, tras el análisis in situ de la TIN generada²⁹. Por lo que el número de escaneos ha aumentado.

2. Reducción de puntos de ruido.

Una vez ha sido obtenida la información tridimensional se han de eliminar las posibles señales de ruido. A pesar de las medida preventivas que se tomaron durante el proceso de toma de datos y de las características de la textura del capitel (idóneas para este tipo de trabajos) es difícil evitar este paso. Se ha procedido a la reducción de este ruido con la ayuda del software Artec Studio v8.

²⁷No siempre el alineamiento automático de frames ejecutado por el software es realizado correctamente, especialmente en el escaneo de determinados objetos donde las características geométricas y de acabado de texturas se alejan de los ideales de digitalización.

²⁸Dependiendo del orden del capitel, podremos encontrarnos con dificultades en este aspecto. Nuestro capitel de estudio posee adornos florales que nos ayuda a la construcción del modelo 3D. Sin embargo, aquellos capiteles pertenecientes al orden dórico estarán caracterizados por un equino y ábaco liso y sencillo.

²⁹Como hemos mencionado anteriormente esta es una de las grandes ventajas de trabajar con sistemas que ofrecen la información 3D en tiempo real.

3. Alineamiento de los escaneos.

Con objeto de realizar el alineamiento de las distintas TIN de nuestro proyecto, han sido seleccionadas aquellas zonas de la superficie del capitel que presentaban una geometría característica a modo de dianas naturales³⁰ (roturas, salientes en la superficie, etc...). Por lo tanto, no es necesario ningún tipo de marcado previo sobre el elemento o la colocación de dianas artificiales. Este hecho refuerza nuestro objetivo de causar el menor estrés añadido al elemento arquitectónico-arqueológico a levantar. En este proyecto se han establecido el mayor número de puntos posibles para las referencias en el alineamiento, no siendo este nunca inferior a cuatro, intentando favorecer la precisión del modelo final.

4. Optimización global.

La optimización permite mejorar el proceso de alineamiento de escaneos de forma global. Es decir, se realiza un análisis de las superficies de solape entre los escaneos permitiendo una desviación de los mismos dentro de unos parámetros dados. Permite la corrección de pequeños e imperceptibles errores de alineamiento en aras de una mayor calidad final del resultado. Es conveniente resaltar que las desviaciones dentro del sistema de referencia son producidas a nivel escaneado, y no a nivel frame. Por lo que los errores de alineamientos entre frames se mantendrán. En este proyecto, dicho algoritmo ha sido realizado con la ayuda del software propietario Arctec Studio v8. Cabe mencionar que existen un gran número de software de gestión de información tridimensional en el que pueden ser realizados los pasos que aquí mencionamos.

5. Triangulación y obtención del modelo tridimensional.

Una vez completada la optimización global, se ha creado un único modelo poligonal 3D, el cual consiste en una aproximación de la superficie que se pretende representar a una superficie poliédrica formada por triángulos cuyos vértices son los puntos de la nube obtenida [6]. Una vez obtenida la malla, se realizaron trabajos relacionados con la optimización de la misma. Fueron aplicados diferentes filtros en orden de crear una malla uniforme, eliminando superficies no deseadas y minimizando las zonas ocultas. Debemos tener en cuenta la complejidad de la superficie del capitel, donde algunas zonas son materialmente imposibles de escanear debido a la geometría del elemento.

Este modelo 3D constituye la parte central del proceso de reconstrucción tridimensional de un objeto. Para ello, es necesario un preciso procesado de los datos mediante el software adecuado³¹. Dicho modelo puede suponer, en ocasiones, ser el resultado final sobre el que realizar análisis geométricos y morfológicos. Sin embargo, en el campo del patrimonio arquitectónico-arqueológico, a menudo son imprescindibles los detalles de acabado en sus

³⁰En el argot del levantamiento se denomina “dianas naturales” a aquellos puntos que son fácilmente diferenciables de los puntos de su entorno y que, por tanto, son fácilmente identificables en trabajos de gabinete y de campo.

³¹Barrera Vera, J.A. (2006) hace un análisis de las principales características del software para la gestión de información tridimensional. Aunque la publicación fuera realizada en 2006 y los avances informáticos sean importantes, se detecta como aquellos software bien valorados en 2006 han seguido evolucionando y son ahora empleados en las principales investigaciones.

texturas. Por ello, no acaba aquí nuestro levantamiento con el escáner de triangulación. El modelo de superficies final se formó con 35.643.392 polígonos y 19.758.352 vértices. Las imágenes del proceso son expuestas en la Figura 5.18.

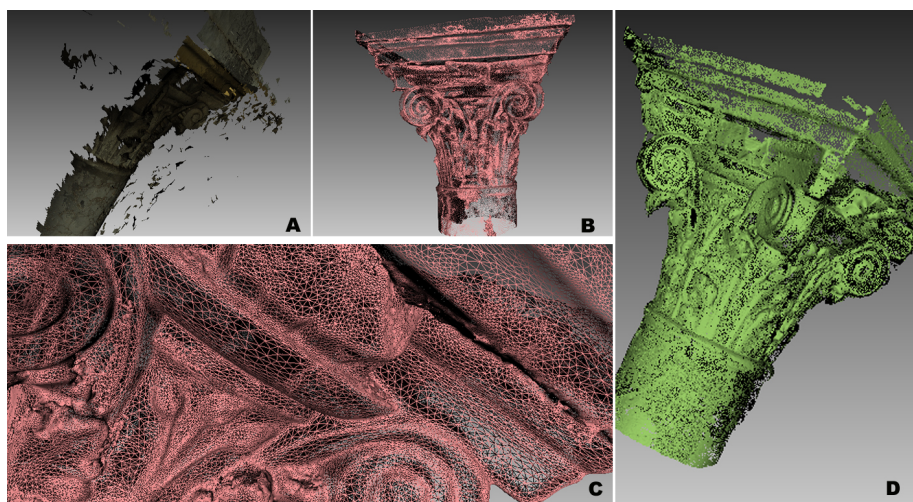


Figura 5.18: Proceso gráfico del levantamiento: A) Ruido producido durante uno de los escaneos; B) Nube de puntos obtenida; C) Proceso TIN; D) Resultado de la alineación de los distintos escaneos. Fuente: Autor.

6. Texturizado del modelo.

Las texturas aportan una valiosa información al modelo tridimensional, especialmente se trata de elementos dentro del ámbito de la arqueología y arquitectura. Existen diversos métodos para dotar al modelo de textura. En este proyecto hemos contado con la información recogida por el escáner, que como hemos mencionado incorporaba una cámara. Es extendido entre la comunidad científica el problema de las cámaras incorporadas en estos equipos de digitalización 3D: sus calidades sensoriales, de óptica y resoluciones son bajas en comparación con la tecnología que le rodea. Quizás, y volviendo a lo ya mencionado, el principal motivo de que esto suceda sea que son equipos pensados para el ámbito industrial, donde las texturas no juegan un papel primordial, y desde aquí, son adaptados a los demás sectores sin importar los requerimientos de estos. En nuestro proyecto hemos empleado el modelo Artec MHT (recoge texturas), y hemos decidido trabajar con los mapas de texturas que su cámara de 1.3 Mp nos proporciona. Sin embargo, también hemos realizado pruebas de nuevas metodologías de texturizado a partir de software fotogramétrico de modelos provenientes de escáner, que deberán ser descritos con detalle en otros apartados.

7. Resultados obtenidos con el escáner de triangulación óptico.

El resultado final es el modelo 3D del capitel estudiado. En la Figura 5.19 se observa el modelo 3D texturizado.

Este tipo de dispositivos permiten la obtención de modelos 3D mediante la creación de mallas basadas en nubes de puntos de precisiones sub-

milimétricas³², con resoluciones de hasta 0,5 mm, con un proceso de trabajo no invasivo, sin contacto directo y en un corto espacio de tiempo.

Para conseguir este resultado ha sido dividido el proceso en trabajo de campo y gabinete, siendo este último más arduo que el primero. La obtención de escaneos con la calidad suficiente afecta al post-proceso de estos datos y, por tanto, a las horas de trabajo necesarias. Partir de unos escaneos de mala calidad dificulta sobremanera el manejo de esta información. En otro ámbito, los recursos informáticos requeridos fueron de vital importancia, hasta el punto de condicionarnos en el desarrollo del trabajo como ha sido descrito en los puntos anteriores.

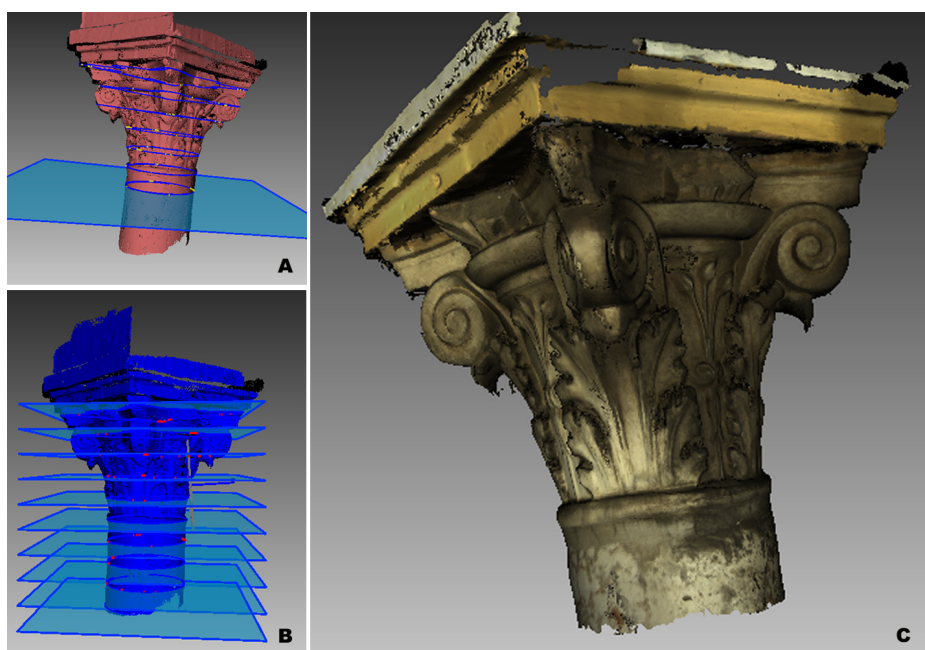


Figura 5.19: Trabajos sobre el modelo final: A y B) Planos de sección al cuerpo del capitel; C) Modelo 3D texturizado. Fuente: Autor.

Protocolo para técnicas fotogramétricas/SFM

Una vez descrito el primer protocolo con aplicación del escáner de triangulación óptico, en los siguientes apartados detallaremos los procesos seguidos para el levantamiento del capitel mediante técnicas fotogramétricas/SFM. Aunque cada uno de los pasos descritos en sendos sub-aparados pueden ser tomados como generales, el proceso de trabajo vendrá considerado por el empleo del propio software. En nuestro proyecto, hemos decidido probar un software joven de la empresa Agisoft denominado PhotoScan. De forma breve, podemos justificar la elección entorno a los siguientes puntos:

³²Según especificaciones, precisiones de hasta 0,1 mm (la precisión del punto respecto a la distancia es de hasta 0,15 por ciento sobre los 1000 metros).

1. Curva de aprendizaje más exponencial para los usuarios primerizos. Debemos resaltar que son multitud los software disponibles en el mercado para la generación de nubes de puntos a partir de técnicas fotogramétricas, nuestra elección por uno en concreto no supone que sea la mejor opción para otros proyectos similares. También se han realizado estudios paralelos y pruebas con software como el conocido Photomodeler, el Open Source VisualSFM, 4e, Autodesk 123D Catch, o Inpho por nombrar algunos.
2. Dispone de licencia educativa.
3. La resolución de las nubes de puntos se ajusta a nuestros parámetros de proyecto.
4. Aunque presenta graves limitaciones en la edición, tanto de nubes de puntos como de superficies, su predisposición a la exportación/importación para el tratamiento en software de gestión de datos 3D, como Geomagic o Meshlab, es buena.
5. Permite una gestión correcta de puntos de control sobre el proyecto.
6. Permite la georeferenciación de proyectos.
7. Se trata de un proyecto abierto, donde las actualizaciones con nuevas herramientas y corrección de *bugs* son constantes.

Toma de datos Como se ha descrito de forma breve anteriormente, la fase de toma de datos en este tipo de técnicas puede ser resumida en la sesión fotográfica y la toma de puntos de control, que nos permitan dar rigor al levantamiento y evaluar los errores del resultado.

Tras los trabajos previos de inspección y ajuste de parámetros fotográficos sobre el terreno, se han realizado las tomas fotográficas que serán la información base para el levantamiento. Juntos con los puntos de control, o medidas de control en nuestro caso. Para ello, se ha empleado una cámara digital réflex, modelo Nikon D5100 con 16,2 millones de píxeles efectivos y objetivo AF-S 18-55³³ mm. Este equipo nos ha permitido realizar los ajustes necesarios sobre la realización de las imágenes para conseguir la mayor calidad de producto digital 2D posible. A continuación se detalla el proceso:

1. Tomas fotográficas:

Estamos en disposición de afirmar que el proceso de la sesión fotográfica es el más importante dentro de la técnica fotogramétrica. No somos los únicos autores, ni tampoco los primeros, que tras los estudios realizados concluimos en el mismo punto. Una incorrecta o insuficiente disposición de las imágenes, sin la nitidez y resolución del elemento suficiente, sin los solapes necesarios en cada par de imágenes, o simplemente un número insuficientes de éstas puede hacer que el trabajo en gabinete no pueda

³³Dependiendo de los medios utilizados puede variar la calidad del resultado final. En este proyecto se empleó este tipo de cámara y lente que nos proporcionó imágenes acordes con los parámetros de calidad buscados.

ser desarrollado de forma correcta y cómoda. En los caso que sea posible, se requerirá un nuevo desplazamiento allí donde el elemento a levantar se encuentre, lo que significa aumentos en tiempos de ejecución y costos adicionales en el presupuesto. Además, será un proceso decisivo para la calidad y precisión del resultado final. Por ello, reivindicamos como un aspecto crucial la planificación previa de esta sesión de campo.

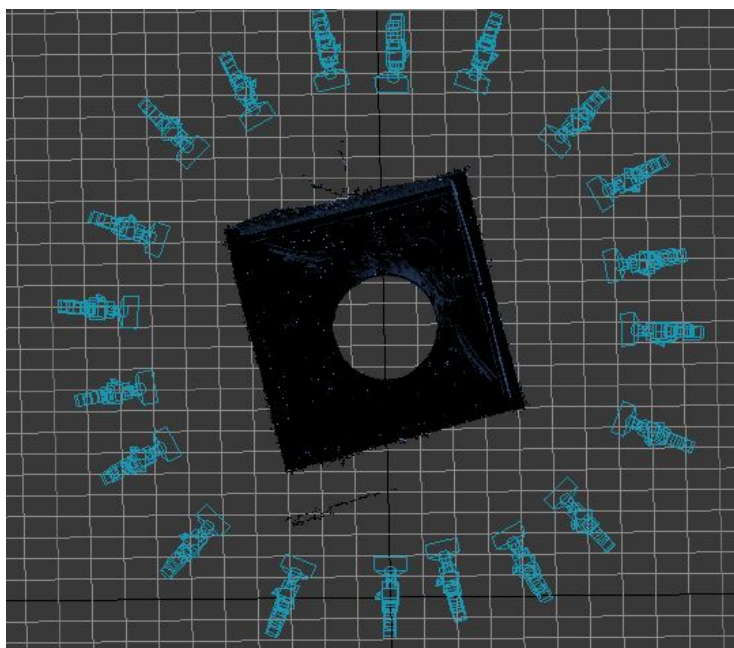


Figura 5.20: Vista en planta de la disposición de las cámaras entorno al capitel (primer nivel). Fuente: Autor.

Tras el análisis previo de la geometría del elemento, se observa que el capitel está cargado de adornos de tipo floral, por lo que no estaba exento de problemas de sombras en determinadas áreas del elemento. Para minimizar los posibles problemas de sombras se han realizado dos sesiones fotográficas diferencias a distinta cota. La primera de ellas ha rodeado el elemento a una cota similar a la del collarino, tomando 3 fotografías por cada cara del capitel más 2 que funcionarán de enlace entre éstas. La segunda sesión tuvo las mismas características que la primera, con excepción de que la cota a la que se tomaron las fotos fue similar a la cota de las volutas. En esta sesión se buscaba cubrir aquellas zonas de sombra que no nos permitían obtener toda la información requerida de la superficie del capitel. Por lo tanto, para el levantamiento fueron tomadas un total de 40 imágenes. Para ambas sesiones se dispuso de una plataforma de trabajo debido a la cota del capitel.

Como consideraciones más importantes podemos detallar las siguientes:

- Planificación detallada de la fase de toma de datos.
- Todas las tomas se han enfocado hacia el centro geométrico del elemento, de forma aproximada, y guardando el mismo radio de giro.

- Aunque dentro de nuestro recursos no se dispone de objetivo de focal fija, las tomas fotográficas han sido tomadas en distancias focales constantes. Se ha procurado configurar una distancia focal media, y alejarnos de los grandes angulares³⁴.
- Las tomas han sido realizadas en formato RAW y ha existido un posterior revelado en TIFF, evitando la compresión JPG y la consecuente introducción de ruido adicional en las imágenes. El ISO ha sido fijado en un valor bajo, en este caso 200.
- La configuración de todos los parámetros de la cámara han sido establecidos buscando el equilibrio entre gran profundidad de campo y correcta exposición y nitidez de las imágenes. Las imágenes no han sido modificadas geométricamente ni cualquier otro tipo de información ráster³⁵.
- En todas las tomas existen rangos de áreas solapadas, en al menos tres de las fotografías, intentado solapar más del 60 por ciento del área fotografiada.
- La textura de nuestro elemento a levantar es idónea. Sin embargo el fondo de nuestro escenario nos perjudica gravemente. Se han evitado tomar las fotografías con fondos en movimiento (personas, hojas, etc...). Aunque se ha intentado minimizar aclaramos que ha sido totalmente necesaria la realización de máscaras³⁶ durante el proyecto.
- Las dos sesiones de toma de fotografías han sido realizadas de forma continuada, teniendo en cuenta la ausencia de sombras y luces no deseadas sobre el capitel. Se ha buscado una luz homogénea de forma natural, sin dispositivos fotográficos adicionales para tal efecto. La selección del elemento a levantar en la galería norte del Cenador también ha sido de ayuda.
- Se han tomado medidas de control con cinta métrica y calibre que, a su vez, han sido utilizadas para escalar el modelo tridimensional y evaluar el resultado final.

2. Equipo empleado.

A continuación se detalla los parámetros del equipo fotográfico empleados para desarrollar el proyecto:

Marca y modelo	Nikon D5100
Resolución del sensor (pix)	4928 x 3264
Distancia focal F(mm)	18
Velocidad de obturación (s)	De 1/60 hasta 1/100
Diafragma (número f)	F/10
ISO	200

Tabla 5.4: Configuración de los parámetros del equipo fotográfico. Fuente: Autor.

³⁴Con objeto de minimizar los efectos de la distorsión radial producida por la lente.

³⁵La modificación geométrica de una imagen empleada para levantamientos tridimensionales es un ítem grave, pues altera los datos de entrada y afecta gravemente a todo el proceso partiendo de un incorrecto alineamiento.

³⁶El software empleado denomina “máscaras” al selección de un área determinada de la foto sobre la que no trabajaremos en la búsqueda de puntos homólogos.

Analizando la Tabla 5.4 podemos observar como han sido ajustados los parámetros de distancia focal fija, la apertura del diafragma y la sensibilidad del sensor (ISO). Mientras que la velocidad de obturación actúa como ajuste automático para conseguir la exposición óptima de la zona central de la fotografía (también ha sido ajustada la preferencia para ajustar un mayor peso en la correcta exposición de la zona central del sensor). En todo momento se ha controlado que dicha velocidad de obturación no fuera inferior a 1/60 segundos para evitar la falta nitidez producidas en las fotos “movidas”, puesto que el trabajo con trípode no es viable en nuestro proyecto. El límite de la velocidad de obturación para el empleo o no del trípode en una sesión fotográfica no viene definido por la calidad del equipo fotográfico. Aunque existen objetivos con reductores de vibraciones (también conocido como VR en Nikon, en inglés *Vibration Reduction*, o IS en Canon, en inglés *Image Stabilizer*, el límite viene definido por las propias experiencias del usuario. Nosotros hemos establecido el límite en 1/60 segundos basados en nuestras experiencias previas y habiendo comprobado que la nitidez resultante es buena.

Procesado de datos Antes de comenzar de lleno con los procesos propios de la creación del modelo tridimensional, nos parece oportuno hacer un paréntesis para hablar sobre aspectos de calibración de la cámara. El software empleado, Agisoft PhotoScan, estima tanto los parámetros geométricos internos de la cámara como los externos de forma automática (conocida como “self-calibration”), dentro del proceso denominado “Photo Alignment”. Tras la importación de las imágenes de en el software, éste realiza una división interna basada en los datos EXIF de las imágenes. Cada una de estas divisiones son denominadas “calibrations groups” en las últimas versiones (v1.0.4). Solo en los casos en los que la información EXIF no puede ser leída por el software, éste estima datos definidos por defectos pudiendo llegar obtener como resultado una calibración inexacta si difiere de aquellos valores que son establecidos por defecto³⁷. Por ello, es aconsejable establecer los valores de forma manual cuando los datos EXIF son inexistentes en los metadatos de las imágenes. Es conveniente resaltar las facilidades de este software para importar y exportar los coeficientes calculados de nuestra cámara para emplearlos en otros programas del mercado³⁸.

Para la realización de estas operaciones el software se basa en el método conocido como “self-calibration”. Este método no se basa en un patrón, sino que busca puntos homólogos entre imágenes del propio proyecto. Por supuesto, es requerido un solape suficiente entre las imágenes capturadas sobre una escena estática. Además, si las imágenes son tomadas con la misma cámara y los mismos parámetros internos, es suficiente una correspondencia entre tres imágenes para reconstruir tanto los parámetros internos como los externos. Aunque no es necesario ningún objeto para la calibración, el número de parámetros estimados aumenta provocando un problema matemático complejo. Agisoft PhotoScan se

³⁷En estos casos establece una distancia focal de 50mm para sensores de *Full Frame* de 35 mm (v1.0.4).

³⁸Ofrece grandes facilidades para el intercambio de datos de calibración de cámaras con programas como PhotoModeler.

apoya en la potencia de los equipos informáticos actuales para resolver dicho problema³⁹. Existen otros métodos de calibración y sería erróneo clasificar unos como mejor que otros, pues éste debe adaptarse a las necesidades del proyecto.

Los coeficientes de distorsión para los parámetros ajustados en nuestra cámara (véase Tabla 5.4 “Configuración de los parámetros del equipo fotográfico”) son:

Distorsión radial		Distorsión tangencial	
K1	-0,099512	P1	$3,6393 \times 10^4$
K2	0,052127	P2	$4,7102 \times 10^4$
K3	-0,032979		

Tabla 5.5: Coeficientes de distorsión radial y tangencial específicos de los parámetros configurados en el equipo fotográfico. Fuente: Autor.

Como puede observarse en la Tabla 5.5, las distorsiones tangenciales son de menor grado que las distorsiones radiales. Es por este hecho que en ocasiones se estiman como nulas. La gráfica que muestra la evolución exponencial de estas distorsiones se muestra en la Figura 5.21.

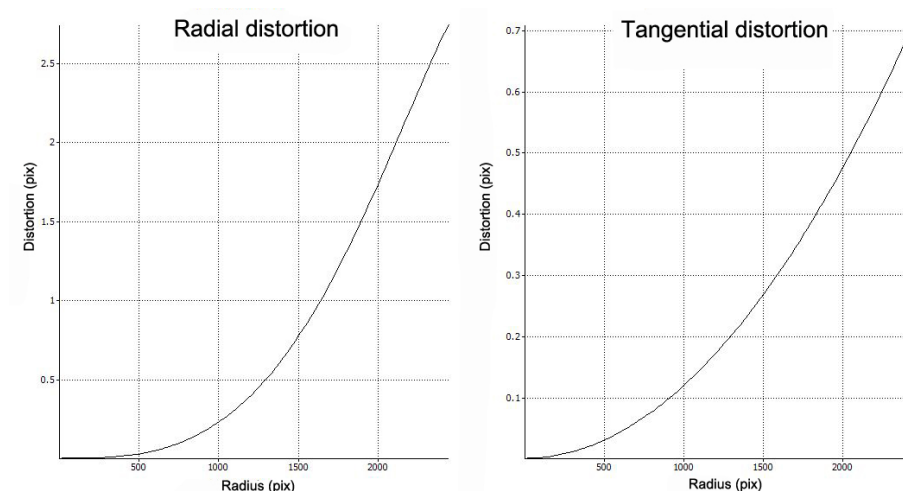


Figura 5.21: Gráficas de la evolución de las distorsiones radial y tangencial para nuestros parámetros fotográficos. Fuente: Autor.

Una vez mencionados los aspectos relativos a la corrección de las distorsiones producidas en imágenes, entraremos a describir de forma detallada cada uno de los pasos que se han desarrollado para la construcción del modelo tridimensional. Aunque se hacen referencias continuas al software empleado, puesto que tratamos de describir un protocolo de actuación, la estructura e ideas generales son fácilmente extrapolables, de modo que puede ser empleado cualquier otro software para realizar el levantamiento.

³⁹El intercambio de experiencias con otros investigadores permite concluir que Agisoft PhotoScan necesita una mayor potencia de equipo informático que Photomodeler para la realización de proyectos con similares características.

1. Importación de la información raster al sistema.

Se ha elaborado una revisión de las fotografías realizadas en campo y, en caso de ser necesario, una selección de aquellas imágenes que por falta de “calidad para su uso fotogramétrico” pudieran afectar de forma negativa a nuestro resultado final. Recordamos que hemos destacado la calidad del producto base (imágenes) como elemento primordial dentro del proceso. La selección y revisión atiende a todos los parámetros mencionados hasta ahora. Es posible añadir y eliminar fotos del proyecto desde el propio panel de navegación del software. La importación se ha realizado en formato TIFF, desde un revelado de los datos en RAW con ayuda del software Camera RAW de Adobe.

Una vez las fotos han sido importadas son marcadas como “NA” (*Not Aligned*) que nos notifica que el proceso de alineamiento no ha sido ejecutado. Sin embargo, tendremos que prestar especial atención a las siglas “NC” (*Not Calibrated*) puesto que nos indica que los metadatos EXIF de la imagen no son suficientes y, como consecuencia, asignará los valores por defecto. Aun así, podríamos continuar con el proceso de alineamiento, pero es de suma importancia conocer aquello que el software hace con nuestros datos, dando rigor al levantamiento⁴⁰, controlando el proceso al completo y adelantándonos a posibles problemas.

2. Elaboración de máscaras (*masks*).

El software emplea un sistema de máscaras para “suprimir” zonas de la fotografía que puedan resultar confusas en la reconstrucción del modelo 3D. Dichas zonas deben ser enmascaradas de forma manual, por lo que es necesario el conocimiento del usuario de los aspectos negativos⁴¹ de las imágenes para su uso en fotogrametría. Dicho conocimiento nos permitirá diferenciar las zonas óptimas de las no deseadas, y podremos manejar las máscaras para favorecer el resultado final de nuestro proyecto. Por ejemplo, existen zonas de nuestras imágenes donde el fondo es óptimo para el alineamiento de las cámaras, sin embargo no tiene sentido elaborar la nube de puntos ni la malla consumiendo recursos y tiempo puesto que no es de nuestro interés. En este caso las máscaras nos permite trabajar de forma ágil y flexible.

Las máscaras pueden ser aplicadas tanto en el proceso de alineamiento evitando fondos y otros elementos no idóneos, como en la construcción de la nube de puntos, el proceso de texturizado y previa a la exportación de ortofotos. Además, dichas máscaras pueden ser importadas/exportadas entre proyectos con archivos raster.

3. Alineamiento de las imágenes (*photo-alignment*).

En este proceso el software reconstruye las posiciones y orientaciones de las cámaras (externa) y calcula los coeficientes de distorsión radial (k_1 , k_2 , k_3 , k_4) y tangencial (p_1 , p_2) a partir de los datos EXIF (f_x , f_y , c_x , c_y , focal) y los puntos homólogos buscados (interna) en el momento de las tomas. Para ello PhotoScan utiliza algoritmos derivados de la técnica

⁴⁰La evolución del software fotogramétrico/SFM hacia la automatización ha producido situaciones de falta de rigor y control sobre el proceso de levantamiento.

⁴¹Dichos aspectos han sido con anterioridad en el Sub-apartado 5.2.2 “Toma de datos”.



Figura 5.22: Elaboración de máscaras (*masks*) previo al proceso de alineamiento de cámaras. A la izquierda, fotografía del elemento a levantar con la inclusión de la máscara. Derecha, raster resultante de la zona de interés seleccionada. Fuente: Autor.

llamada *Structure From Motion*. SFM es conocida en los últimos años por la inclusión en software como Bundler y Microsoft Photosynth, ambos de libre acceso. Los parámetros controlables nos permiten sacrificar precisión en la alineación a cambio de reducción de tiempo en el proceso. En este caso, nos hemos decantado por tener mejores resultados en la precisión, con la consiguiente penalización en tiempos.

Como resultado se muestra la posición relativa de las cámaras y una nube de puntos previa de baja densidad. Todo ello en un sistema de coordenadas local, a o ser que trabajamos con cámaras posicionadas mediante GPS, o con puntos de control (denominados *markers* en el software) introducidos de forma previa con las coordenadas correspondientes.

Es necesaria una revisión manual del resultado para verificar que todas las imágenes han sido alineadas de forma correcta. El software proporciona una herramienta de ayuda que estima la calidad de la imagen para los procesos fotogramétricos llevados a cabo. Esta herramienta esta accesible desde el menú “photos” y deben ser deshabilitadas las imágenes cuyos valores sean menores a 0.5. De igual modo, recomendamos que los parámetros ajustados en este proceso busquen la mayor precisión de resultados con la consecuente penalización de consumo de recursos y tiempo. Esta recomendación se basa en que los resultados obtenidos en el alineamiento nos condicionan los procesos posteriores y serán la base para la construcción de la nube de puntos.

Por último, y con objeto de minimizar los tiempos de trabajo podemos establecer una preselección previa de los pares fotogramétricos, que normalmente, a no se que trabajamos con puntos de control, se estable en genérico para estimar que las imágenes han sido tomadas de forma consecutiva.



Figura 5.23: Captura de imágenes durante el proceso de levantamiento. De izquierda a derecha: nube puntos creada (también *markers* y medidas de control); TIN; superficies previas a al proceso de texturizado. Fuente: Autor.

4. Construcción de la nube de puntos.

La generación de la nube de puntos puede ser optimizada según los requisitos del proyecto. El software dispone de tres estimaciones de escenarios posibles: la primera de ellas para levantamientos donde la geometría es compleja y requiere grandes niveles de detalle (*mild*); la segunda para

aquellos escenarios donde no son requeridos dichos niveles (*aggressive*); y una tercera a medio camino entre las anteriores (*moderate*). En nuestro proyecto hemos empleado el parámetro *mild* con el objetivo de conseguir una óptima definición de los adornos que porta el capitel, así como su deterioro superficial. El resultado (Figura 5.23) puede ser modificado con las herramientas básicas el propio software habilita. En cambio, para realizar modificaciones más profundas de la nube puntos se aconseja exportar trabajar con un software de gestión más avanzado para volver a importar en ambiente PhotoScan y seguir con el siguiente proceso.

5. Construcción de la TIN.

Una vez creada la nube de puntos de alta densidad y modificada (si es necesario) para mejorar el resultado, podemos elaborar la TIN (Triangulated Irregular Network). Son varios los parámetros que debemos ajustar en este proceso atendiendo a tipo de superficie a levantar, la nube de puntos base, la resolución de la TIN deseada, la interpolación de información (si se requiere).

En nuestro caso, se ha empleado el parámetro “arbitrary” para la superficie tipo que permite no estimar ningún tipo de geometría previa, siendo óptimo para el caso del capitel, y basándonos en la nube de puntos densa creada en el punto anterior. La resolución de la TIN ha sido ajustada sin límite y la interpolación de información deshabilitada con el objetivo de valorar la fidelidad del modelo final en todas las áreas de la superficie. Por último, debemos mencionar que el propio software permite un decimado de la malla sin necesidad de apoyo de un segundo software. Ésta puede apreciarse en la Figura 5.23.

6. Mapas de texturas.

Llegados a este punto, todos los aspectos geométricos del modelo 3D han sido resueltos. Es decir, ya es posible el estudio y análisis geométrico en profundidad del capitel levantado (esta afirmación también puede ser aplicada al caso de la generación de la nube de puntos, aunque dependerá de los requisitos del proyecto y de la densidad de puntos conseguida). Pero existen ocasiones en las que la visualización de texturas juegan un papel primordial (difusión cultural, empleo museístico, análisis de deterioros superficiales, etc...). En estos casos es necesario la ejecución del mapeo de texturas, que determinará el modo en que la textura del objeto real será recogida en el atlas de texturas.

Los parámetros deben ser definidos atendiendo a la geometría del elemento levantado, los objetivos de visualización y exportación 2D o 3D de los resultados. Existen varias opciones de mapeado. En el presente proyecto, tras la realización de diversas pruebas, se estima óptimo la utilización del modo genérico, que no asume ningún tipo de geometría definida. En levantamientos del terreno, fachadas de edificios y otro tipo de elementos donde existe un eje predominante, la utilización de este parámetro genérico deber ser reemplazada. Por último, y según la exposición de las imágenes empleadas, debemos ajustar el modo en que el valor RGB es asignado al atlas final. La resolución del atlas final vendrá determinado por la resolución de las imágenes fuente y los requisitos del proyecto. Pero debemos tener en

cuenta que, en el caso de que la superficie a levantar sea recogida en su totalidad en cada una de las imágenes, no tiene sentido generar atlas de mayor resolución que las imágenes fuentes pues estaremos consumiendo tiempo y recursos de forma innecesaria sin que el resultado final pueda verse mejorado.

7. Exportar resultados.

Como ha sido mencionado en líneas anteriores, las exportaciones (y guardados) de resultados pueden ser realizados conforme se ejecutan cada uno de los procesos. Destacamos la variedad de extensiones de archivos de salida disponibles. En el caso de las nubes de puntos pueden ser exportadas en múltiples formatos: avefront OBJ, Stanford PLY, CHAN file format, Boujou TXT file format, Bundler OUT file format, Omega Phi Kappa text file format, PhotoScan structure file format XML based. Mientras que la exportación del modelo permite las extensiones: Wavefront OBJ, 3DS file format, VRML, Stanford PLY, COLLADA, Autodesk DXF y U3D.

En el caso de exportar resultados de un modelo no referenciado, éste se exportará en el sistema de coordenadas asignado por defecto por el software. Para dar solución a esta situación el software propone dos métodos. El primero de ellos, a nuestro juicio no recomendable para proyectos que requieran un mínimo rigor técnico, consiste en rotar el modelo 3D de forma manual manteniendo el sistema de coordenadas inmóvil y de este modo hacer coincidir la orientación del modelo con los ejes del sistema de referencia por defecto para realizar las exportaciones de la forma necesaria. El segundo de ellos, se basa en la definición de líneas a partir de puntos de control (*markers*) sobre la que definir los ejes en el proceso de exportación. Esta solución está disponible en la exportación de ortofotos, sin embargo, no en la exportación del modelo (ya sea como nube de puntos, TIN o TIN texturizada). Se han detectado dificultades para definir dichos ejes en el proceso de exportación de ortofotos. Tras nuestras experiencias, podemos afirmar que la solución óptima pasa por trabajar con modelo referenciados mediante puntos de control tomados con estación total, puesto que de otro modo la definición de ejes se desarrolla de forma imprecisa.

Citando conversaciones con el investigador Jorge Cueli, existen alternativas para girar el modelo dentro del ambiente PhotoScan. Dichas alternativas pasan por cargar el modelo en un segundo software que permita un cálculo preciso de giro necesario (por ejemplo, AutoCAD), ayudarse de un tercer software que ejecute el giro de las coordenadas de los puntos de control (por ejemplo, Excel) y, finalmente, importar el archivo de texto con las nuevas coordenadas ya giradas en el software fotogramétrico. No deja de ser un trabajo más laborioso de lo deseado, sobretodo siendo un software no gratuito, pero no por ello menos interesante.

Como podemos apreciar el proceso de trabajo no corresponde con un tareas manuales laboriosas. Los mayores recursos temporales del técnico han sido consumidos en la generación de las máscaras (*masks*). Solo en aquellos casos donde las características del proyecto son complejas y se necesita del apoyo de un tercer software especializado de gestión de información 3D, los recursos temporales

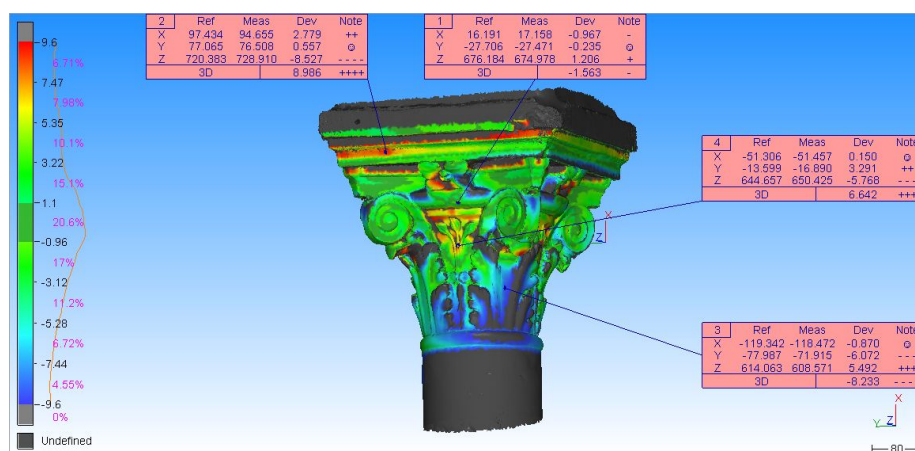


Figura 5.24: Análisis geométrico comparativo tridimensional de dos capiteles de similar geometría. Mapa de desviaciones (3DReshaper). Fuente: Autor.

y materiales se elevan (también aumentan las necesidades de especialización del técnico).

El resultado final del proceso es el modelo tridimensional geométrico y texturizado del capitel. Dicho modelo 3D contiene errores sub-centimétricos y es posible el estudio científico detallado, comparación con otros modelos, visualización para el gran público, etc... de forma digital.

5.3. Comparación de métodos

Cabe resaltar la diferencia en acabado visual entre ambos métodos. El método fotogramétrico permite resoluciones de los mapas de texturas mayores con el resultado de modelos tridimensionales visualmente más atractivos. En el método de levantamiento mediante escáner nos ha limitado los bajos recursos en cuanto a resolución de cámara empleada.

Debemos señalar la diferencia en cuanto a inversión económica entre las distintas tecnologías. Mientras que para el método fotogramétrico basta con una cámara fotográfica convencional (que deberá ser calibrada de una forma u otra) más el software necesario, para trabajar con escaneos es necesario la adquisición del equipo, que incrementa el presupuesto final, sin entrar a valorar el software necesario para su gestión (normalmente será propietario).

En el método fotogramétrico, la calidad del equipo fotográfico empleado incide en el resultado final. En cuanto al software, existe una gran variedad en el mercado, pudiendo incluso realizar levantamientos completos mediante el uso de software libre.

En cuanto a los requerimientos del equipo informático en ambos casos es elevado (ya se ha definido las características del equipo empleado en el presente proyecto). Han sido resueltos algunos problemas relacionados con este aspecto a lo largo de nuestro trabajo, solucionados con la división del proyecto (recordamos la división del capitel en distintas zonas para el escaneado).

Continuando con la visita allí donde se encuentra el capitel, debimos cerciorarnos de la existencia de toma eléctrica para el caso del escaneado. Además del escáner, fue necesario el transporte del equipo informático hasta el lugar. Por otro lado, el método fotogramétrico se basó en el transporte de la cámara fotográfica, trípode y herramientas de medición de pequeño volumen y peso fácilmente transportables.

En los alrededores del capitel no existía ningún obstáculo que nos dificultase la captura de datos, aunque como hemos señalado anteriormente el rango de trabajo del escáner óptico se limita a unas distancias de entre 0,40 m y 1 m para elementos de estas dimensiones, mientras que con las cámaras fotográficas estos rangos pueden verse ampliados.

El manejo del software es relativamente sencillo en ambos casos de estudio. Cada nueva actualización se tiende hacia la automatización de los procesos. Sin embargo, en el caso del manejo del escáner óptico y su movimiento alrededor del objeto a escanear, se han encontrado dificultades para el registro de frames durante el trabajo.

Durante la fase de post-proceso de datos, el tiempo de operario empleado en cada método varió de forma significativa, siendo el tiempo empleado en el método de escaneo óptico mayor que en el fotogramétrico. Esto se debió en gran medida a la necesidad de dividir el trabajo (algo que posteriormente debía volver a unificarse) y un mayor procesamiento para la optimización de las nubes de puntos facilitadas por el escáner.

5.4. Primeros resultados gráficos

A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos, todos ellos extraídos del modelo tridimensional digitalizado. Podemos observar los siguientes contenidos:

- Superposición de secciones dadas a la misma altura a ambos modelos del capitel obtenidos por ambos métodos.
- Conjunto de secciones al cuerpo del capitel distanciadas 50 mm del modelo obtenido mediante escaneado.
- Orto-proyecciones de cada una de las caras del capitel del modelo obtenido mediante fotogrametría.
- Captura del modelo 3D conseguido del modelo obtenido mediante fotogrametría.
- Detalle del resultado del modelo fotogramétrico.

Como puede observar en la Figura 5.25, las desviaciones producidas entre ambos modelos tridimensionales del capitel son mínimas. La superposición de las secciones dadas a la misma cota se asemejan con gran exactitud.

En la Figura 5.26 podemos observar secciones del tronco del capitel que distan entre ellas 50 mm. Por último, se muestran las orto-proyecciones del modelo 3D (Figuras 5.27 y 5.28), y un zoom sobre el detalle conseguido en el modelo (Figura 5.29). En la Figura 5.30 se muestra el modelo tridimensional fotogramétrico creado.



Figura 5.25: Secciones realizadas al modelo fotogramétrico y escaneado a la misma cota. Fuente: Autor.

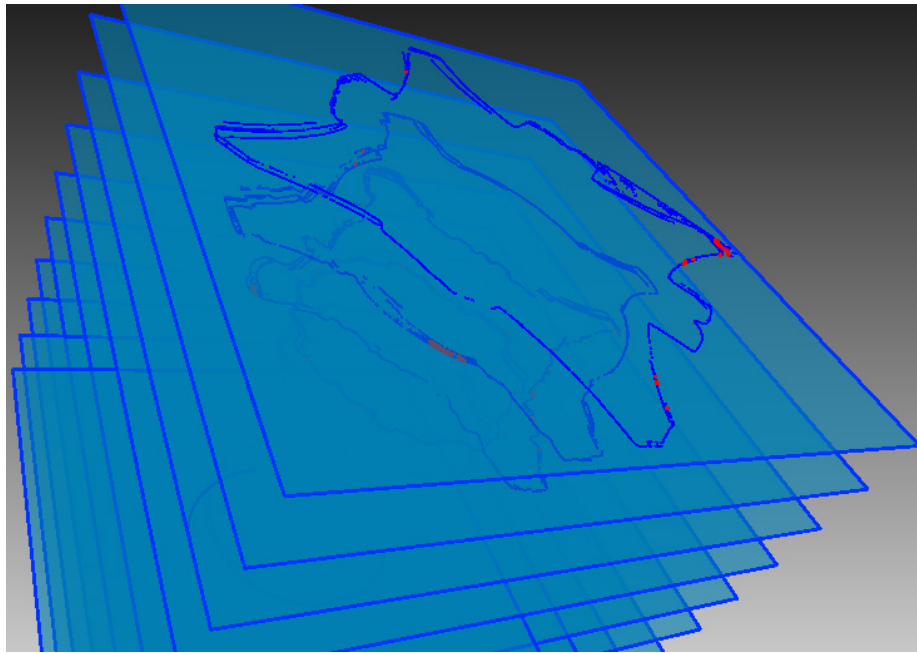


Figura 5.26: Secciones realizadas al tronco del modelo de escaneado cada 50 mm. Fuente: Autor.



Figura 5.27: Orto-proyecciones del modelo 3D fotogramétrico. Este y norte.
Fuente: Autor.



Figura 5.28: Orto-proyecciones del modelo 3D fotogramétrico. Oeste y sur. Fuente: Autor.

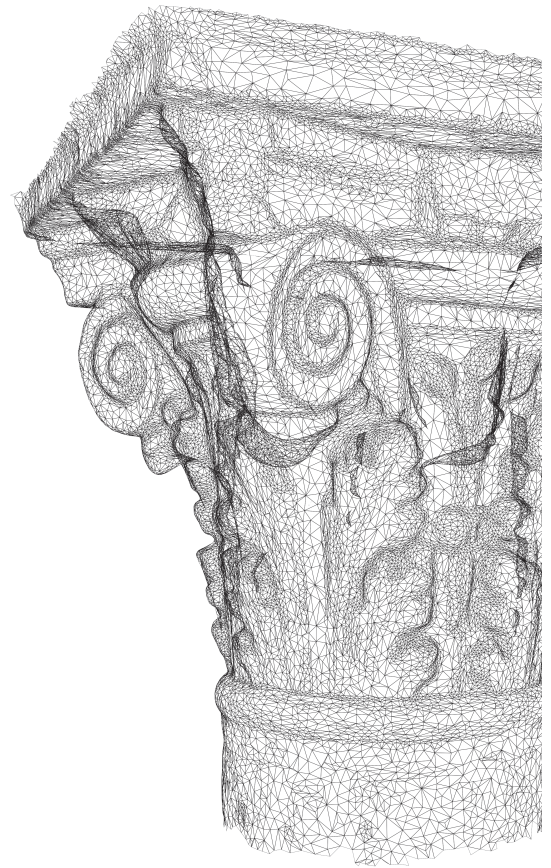


Figura 5.29: Detalle del modelo 3D fotogramétrico. Fuente: Autor.



Figura 5.30: Modelo 3D fotogramétrico creado. Fuente: Autor.

Levantamiento de los capiteles del Patio de las Muñecas



Capítulo 6

Levantamiento de los capiteles del Patio de las Muñecas

6.1. Introducción

En las siguientes líneas detallaremos los trabajos realizados para el levantamiento fotogramétrico, de forma conjunta, de los capiteles del Patio de las Muñecas del Real Alcázar de Sevilla. Tratamos de conseguir una representación gráfica de dichos capiteles a partir de aplicaciones informáticas, en nuestro caso utilizando “Agisoft Photoscan”, con el fin de crear un registro con capacidad métrica, un modelado 3D de cada capitel y ser capaz de servir como documentación de apoyo para investigaciones futuras.

6.1.1. Sobre el Patio de las Muñecas

EL Patio de las Muñecas es de pequeñas proporciones y rodeado de galerías con arcos que apoyan sobre un total de 10 columnas. Forma parte del sector más doméstico del palacio mudéjar el cual se organiza entorno a éste y el Patio de las Doncellas (más representativo).

En cuanto a sus columnas y capiteles podemos decir que la información sobre estos es bastante imprecisa y escasa. Según comenta Ana Marín Fidalgo en

su libro Real Alcázar de Sevilla [57] las columnas podrían haber sido traídas de Medinat Al-zahra y estar coronadas por capiteles califales. El carácter ornamental del capitel islámico no es exclusivo de esta cultura sino que llegó a ella con dicha función plenamente desarrollada. No obstante como tal forma decorativa tuvo sus peculiaridades propias.

Basándonos en la posible procedencia de estos de Medinat Al-Zahra, realizamos una pequeña investigación en cuanto a las posibles similitudes entre capiteles. A continuación, en las siguientes imágenes podemos encontrar algunos de los capiteles del Patio de las Muñecas comparados con aquellos procedentes de Medinat Al-Zahra, Córdoba.



Figura 6.1: Izq.: Capitel del Patio de las Muñecas. Fuente: Autor. Der.: Capitel corintio con decoración tallada a trepano perteneciente al Salón de Abd al-Rahman III. Fuente: Guía Oficial Medinat Al-zahra.

6.2. Trabajos de levantamiento

Este proyecto de levantamiento se realiza con el fin de ayudar a la memoria histórica que se tiene del Real Alcázar de Sevilla. Creando de esta manera un archivo que en la actualidad es inexistente en cuanto a los capiteles del Patio de las Muñecas.

También puede llegar a servir como base de estudio para futuras líneas de investigación sobre este tema, para todo aquel interesado podrá tener en sus



Figura 6.2: Izq.: Capitel del Patio de las Muñecas. Fuente: Autor. Der.: Capitel hispanorromano, con inscripción en árabe datada entre los años 950- 975, hallado en Medina Al-Zahra. Fuente: Victoria and Albert Museum de Londres.



Figura 6.3: Izq.: Capitel del Patio de las Muñecas. Fuente: Autor. Der.: Tipo corintio, con dos filas de hojas de acanto y volutas rematadas en flor. Fuente: Museo arqueológico Nacional, Madrid.

manos documentación que tiene un carácter métrico, que hasta entonces no teníamos la posibilidad de contar con ella.

Gracias a los avances tecnológicos se hace posible la elaboración de este tipo de documentos, haciendo posible cualquier tipo de estudio referente a este tema.

6.2.1. Planificación

El primer paso a seguir posterior a la búsqueda de información, pero previo al trabajo propiamente dicho de campo, es hacer una visita de reconocimiento, con el fin de que una vez llegado el momento del trabajo de campo, se haga de una manera eficaz y rápida.

En primer lugar, realizaremos un croquis del Patio de las muñecas, que podemos ver en la Figura 6.4, donde definimos cada uno de los capiteles como P01, P02, P03, y así sucesivamente hasta P10.

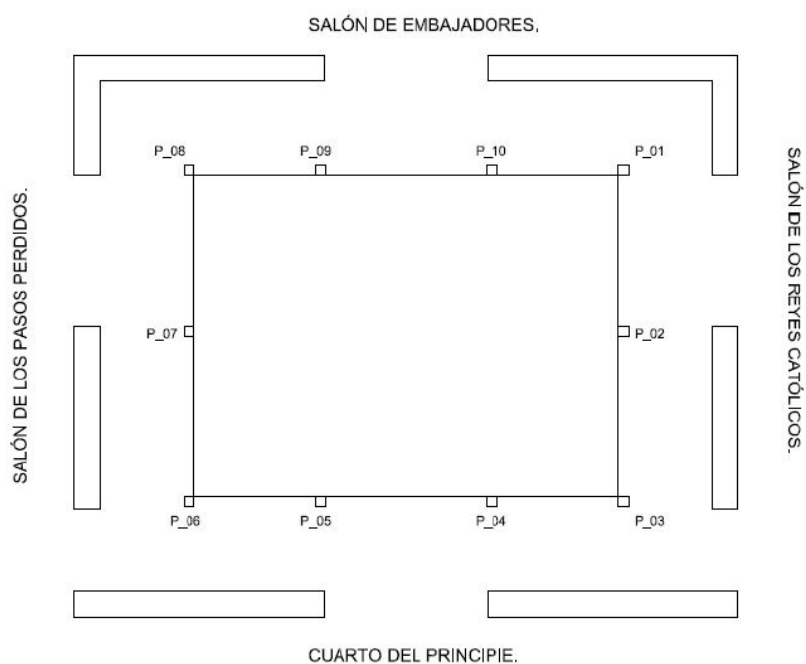


Figura 6.4: Croquis del Patio de las Muñecas con identificación de capiteles objeto de estudio. Fuente: Autor.

Además debemos de tener en cuenta varios factores, como son:

- La posición del sol, ya que para la toma de fotografías es un elemento del que estaremos muy condicionados. Pensando desde un inicio que lo ideal para ello es hacerlas con luz natural pero sin que esta incida de manera

directa sobre el elemento, hablando en términos propios de este proyecto sobre los capiteles, además de que las fotografías se tomarían sin flash¹.

- No debemos olvidarnos de que el Patio de las Muñecas es un patio interior y de cómo están situados capiteles alrededor de este, como observamos en el croquis de la Figura 6.4, habrá zonas aquellas que se encuentran en la parte interior de la galería donde no incidirá ningún tipo de luz, por lo que se nos hace bastante complicado el poder realizar las fotografías de una manera “ideal”.

Por ello en un principio realizaremos un estudio comparativo sobre un capitel, de manera que tomaremos las fotografías sin flash y con flash, y estudiaremos los resultados obtenidos.

Tras la primera visita de reconocimiento determinamos las herramientas que vamos a utilizar, quedando enumeradas:

1. Cámara fotográfica: NIKON D90/NIKON D5100.
2. Distanciómetro láser.
3. Estación Total Leica TS-02 (acompañada de todos sus elementos de trabajo).

6.2.2. Trabajo de campo

Para empezar realizaremos las fotografías del capitel sobre el que vamos a realizar un estudio comparativo de como afecta el uso del flash a la geometría tridimensional final conseguida. Este pequeño análisis viene justificado por las condiciones de luz adversas del Patio de las Muñecas.

El capitel a estudiar es el P04 (Figura 6.5), ya que es uno de los que presenta más recodos en su talla, y nos puede crear problemas a la hora de la toma de fotografías con flash, capturando píxeles en sombras de forma aleatoria según el ángulo de disparo. Los píxeles serían distintos de una imagen a otra, mientras que uno de los requisitos que buscamos a la hora de la obtención de un levantamiento 3D es la concordancia de píxeles entre imágenes.

El procedimiento que vamos a seguir para la toma fotográfica será el mismo en cada uno de los capiteles, no existe un patrón más allá del que aquí hemos tratado definir. Necesitamos una serie de imágenes que recojan todas las vistas posibles del elemento. El número de fotografías, y por tanto porcentaje de solape, vendrá definido por los recursos de procesamiento informático disponibles. Más archivos de imagen nos proporcionarán mejores resultados finales en cuanto a calidad y precisión (siempre y cuando todas nuestras imágenes aporten valor). Tomaremos las imágenes con la máxima resolución posible según el sensor de nuestra Nikon D5100. Tras varias pruebas de encuadre usaremos una distancia focal de 35 mm en la toma de imágenes en el capitel P04 y en los puntos de

¹Se realizará un estudio para analizar los resultados en tomas realizadas con flash y sin él.



Figura 6.5: Capitel P04 del Patio de las Muñecas. Fuente: Autor.

control. Y estableceremos el valor ISO-200, ya que valores más altos inducirán a que las imágenes tengan ruido adicional. Además debemos tener en cuenta que el elemento que vamos a fotografiar debe asumir el área máxima del sensor de la cámara con objeto de aprovechar al máximo la resolución disponible.

Primero definimos la distancia a la que se harán las fotografías, ajustada en pruebas de encuadre previas y controlada distanciómetro láser. Queda definida como 1,20 m. respecto de la columna, y se realizarán alrededor de cada capitel a tres niveles diferentes, como queda reflejado en la Figura 6.6.

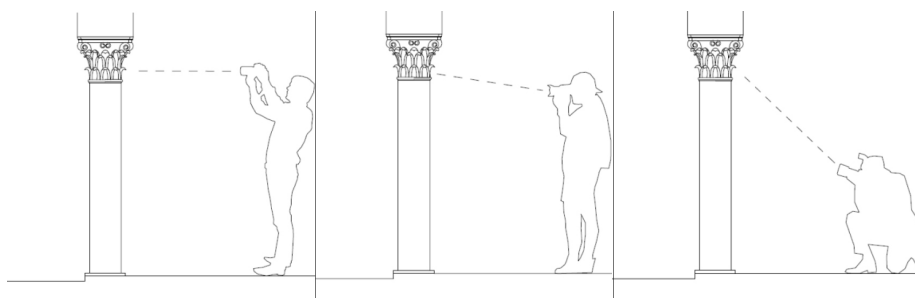


Figura 6.6: Secuencia para la captura de imágenes. Fuente: Autor.

La primera posición sería con la cámara lo más horizontal posible desde nuestra propia altura. Una segunda desde un punto de vista lo más bajo posible, y por último, un tercero desde otro nivel superior a los anteriores, de esta manera obtendremos un modelo 3D mucho más detallado, al realizar fotografías desde distintas perspectivas. En general de cada capitel obtendremos una serie de entre 45-55 fotografías.

Una vez tomada las imágenes del P04 con y sin flash, realizamos las tareas para elaborar sendos modelos tridimensionales². Estas tareas serán definidas de forma muy detallada en las próximas líneas puesto que el objeto de esta sección es el análisis de la afectación del flash en productos o modelos finales.

Una vez elaborados los modelos tridimensionales finales, hemos procedido a su alineamiento y comparación bajo un mismo sistema de referencia (Figura 6.7). Para ello hemos empleado el software comercial Geomagic Studio³.

Gracias al análisis de los resultados y al historiograma generado (Figura 6.7) que compara el capitel tomado con fotografías con flash y sin flash podemos observar que las desviaciones quedan dentro del milímetro. Anotamos que las zonas de mayor desviación coinciden en aquellas áreas donde menos cobertura de píxeles tenemos: las zonas altas de las volutas. La campana de Gauss nos indica que los modelos tienen una alta similitud y no se detectan errores aislados. En cuanto a las texturas podemos decir sin lugar a dudas que el modelo elaborado a partir de fotografías con flash refleja una mayor homogeneidad tal y como era de esperar puesto que el efecto de la orientación del capitel respecto de la galería y los problemas de entrada de luz se minimizan.

²Nos referimos al modelo tridimensional con flash y el modelo tridimensional sin flash.

³Proponemos el software CloudCompare como alternativa gratuita para realizar estas labores con resultados similares.

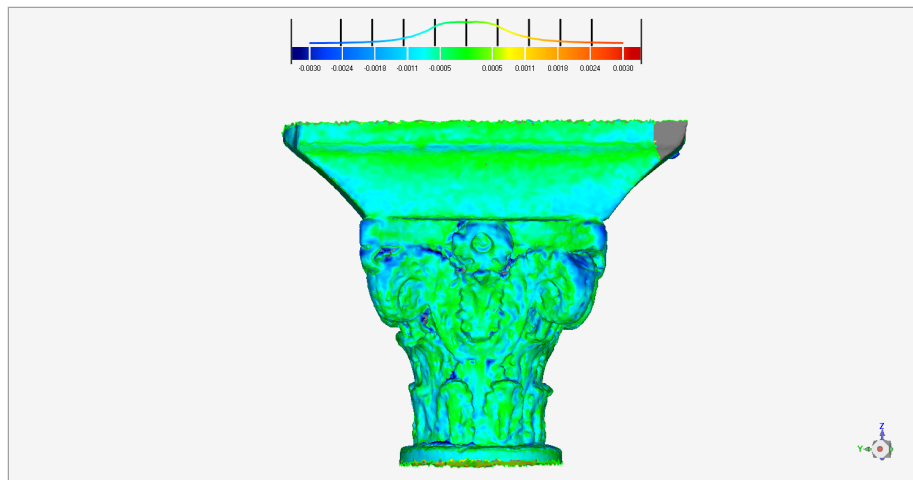


Figura 6.7: Historiograma de comparación entre modelos a partir de imágenes con y sin flash. Fuente: Autor.

De esta manera justificaríamos el uso de flash en las fotografías de este proyecto tras la comparativa y a la vista de los datos obtenidos.

La segunda parte que realizaremos como trabajo de campo será la toma de puntos de control de cada capitel, que nos servirá para englobar cada uno de los modelos individualizados de los capiteles en un sistema de referencia común. Esta tarea nos reportará los siguientes beneficios:

- Ordenar en el espacio los 10 capiteles formando un único modelo 3D que permitirá el estudio y análisis del Patio como conjunto.
- Controlar las desviaciones en la elaboración de cada uno de los modelos minimizando los errores y dando valor métrico al proyecto.

Esta toma de puntos la realizamos a través de la Estación Total Leica TS-02 estacionada en el centro del Patio de las Muñecas, como queda definido en el siguiente croquis (Figura 6.8).

La posición de la estación total no es exactamente en el centro del patio debido a un elemento decorativo que allí se encontraba. Por lo que fue colocada lo más centrada posible de manera que pudiésemos realizar todas las visuales de los puntos de control con un único estacionamiento.

De cada capitel se han tomado un total de 4 puntos de control en distintas orientaciones del mismo. Para la definición de los puntos de control nos hemos basado en la búsqueda de las llamadas dianas naturales del elemento⁴ (Figura 6.9).

⁴Son numerosos los autores que hacen referencia a este tipo de puntos en nuestro campo de especialización. Las dianas naturales son pequeñas imperfecciones de tipo superficial de los elementos a levantar que permiten ser detectados en las diferentes imágenes a modo de puntos de control o puntos homólogos.

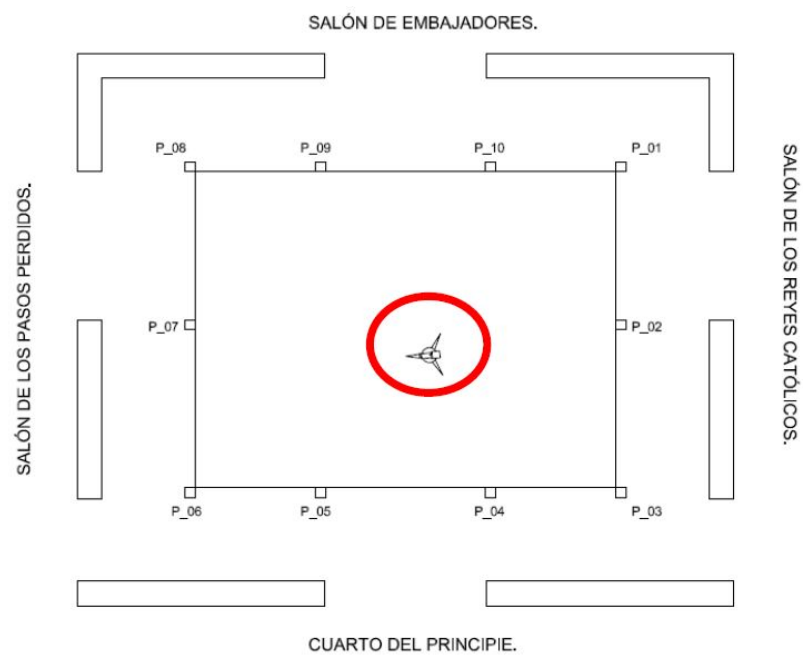


Figura 6.8: Croquis en planta del Patio de las Muñecas con posicionamiento de Estación Total TS02. Fuente: Autor.



Figura 6.9: Diana natural escogida en capitel 1(P01). Fuente: Autor.

La tercera y última parte de campo engloba la toma de fotografías de cada uno de los puntos de control que íbamos seleccionando, y que posteriormente nos servirá para colocar nuestros modelos 3D ordenados en el espacio. Aprovechando el puntero láser que nuestra Estación Total Leica TS02 incorpora, hemos realizado fotografías de los puntos de control leídos. De esta forma será más sencilla su identificación en la fase de gabinete. Esta fase del proyecto se puede apreciar en Figura 6.10.



Figura 6.10: Fotografía y visual de punto de control con Estación Total TS02. Fuente: Autor.

Tras la realización de un pre-alineamiento, incluyendo las fotografías con los puntos de control, hemos procedido a la incorporación de las coordenadas exportadas de la estación total en nuestro proyecto. Dicho volcado se ha realizado directamente sobre el software de levantamiento fotogramétrico. Es muy importante que una vez establecidos los puntos de control y alineadas las imágenes, se proceda a la desactivación de aquellas fotos que contenían el puntero láser (fotos de puntos de control) en fases posteriores de construcción de texturas.

Todas las coordenadas del total de 40 puntos de control puede observarse en la Figura 6.11, estacionando en un único punto base denominado E1.

6.2.3. Trabajo de gabinete

Los trabajos de oficina se centrarán en el volcado y procesamiento de toda la información recogida en las sesiones de campo en el software fotogramétrico Agisoft Photoscan.

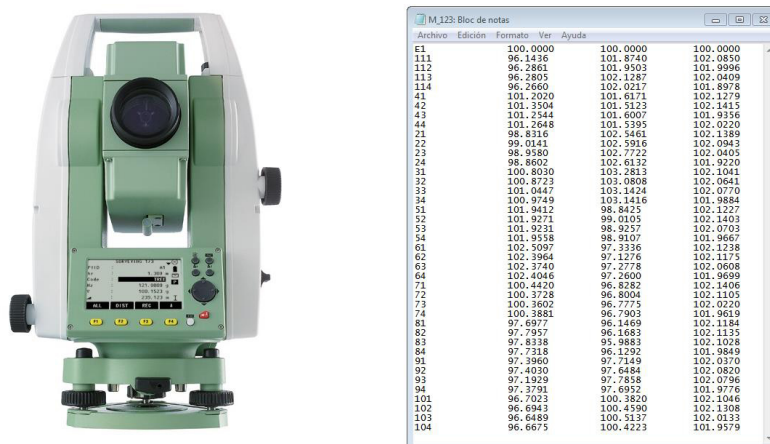


Figura 6.11: Exportación de coordenadas desde Estación Total TS02. Fuente: Autor.

Como primer punto crucial debemos señalar que Photoscan debe operar con las imágenes originales (a no ser que bajo nuestra responsabilidad deseemos otra cosa), por ello no debemos modificar geométricamente ni dar rotación a las imágenes⁵.

En líneas muy generales, el procesamiento de imágenes de Photoscan engloba las siguientes fases:

1. Volcado de archivos de imágenes.
2. Fase de alineamiento.
3. Fase de construcción de la nube de puntos.
4. Fase de construcción de la TIN (modelo poligonal 3D).
5. Fase de construcción de texturas.

Debemos conocer que el programa nos permite trabajar de forma general en un *Workspace*, o bien mediante *Chunk* que posibilita subdividir los proyectos, es decir, para aquellos casos en los que es muy difícil o incluso imposible generar el modelo 3D de una sola vez, cargándolo todo en el *Workspace*, debido a los recursos informáticos limitados o la cantidad masiva de archivos de imagen. Por norma general, el desarrollo de varios *Chunk* forman el proyecto.

Cada una de las fases anteriormente nombradas (la carga y alineación de las fotografías, la construcción de la geometría y la formación de las texturas) se

⁵Deberemos tener especial cuidado si antes de volcar los archivos al software fotogramétrico deseamos visualizar las imágenes. Existen SO que detectan la rotación de la imagen basándose en los metadatos de los archivos y producen una rotación guardando posteriormente. En estos casos, se recomienda visualizar las imágenes (y rotarlas si es necesario) dentro del software fotogramétrico.

puede realizar por *Chunk* de forma totalmente individualizada y al final, como veremos, combinaremos los resultados para conseguir un único proyecto.

Llevando esta explicación a nuestro proyecto, definiríamos como nuestro *Workspace* el Patio de las Muñecas al completo, para luego crear distintos *Chunk* por cada capitel, y poder así trabajar con más facilidad acorde a nuestros recursos y orden. Anotar que cada capitel (10 en total) será un *Chunk*. En primer lugar creamos nuestro primer *Chunk*, donde quedará definido nuestro capitel número 1, (P01) y añadiremos las fotografías que corresponde al capitel 1.

El siguiente paso será la creación de las máscaras (o *Mask*). Estas máscaras definen áreas de las imágenes (píxeles) que quedan fuera de nuestro interés y que pueden llegar a restar valor para el proceso de levantamiento⁶. Los píxeles enmascarados de las fotografías no se tienen en cuenta al estimar las posiciones de la cámara en el espacio. Como hemos mencionado a pie de página no siempre debemos actuar de esa forma.



Figura 6.12: Proceso de creación de *Mask* de izquierda a derecha: archivo de imagen original, selección manual de fronteras, archivo de imagen con superposición de máscara, archivo de máscara creado. Fuente: Autor.

El proceso de elaboración de máscaras es totalmente manual en este proyecto. Aunque existe la posibilidad de una selección automática, similar al pincel mágico de aplicaciones fotográficas, para archivos de imagen con fuerte contraste entre zonas objetivo y zonas a ocultar.

Una vez preparada toda la información/archivos que usaremos para realizar el levantamiento podemos comenzar la fase de alineación de cámaras. Esta fase del proyecto tiene como objetivo posicionar en el espacio tridimensional los puntos de vista desde donde se capturaron las imágenes. El software ofrece resultados de las coordenadas espaciales de las cámaras y posibilita la visualización de las mismas, junto una primera nube de puntos dispersa del elemento objeto de interés según sus estimaciones. Este detalle puede observarse en la Figura 6.13.

Inciendiando en el área de interés a levantar, el software hace una primera estimación según factores como la cantidad de puntos homólogos encontrados en determinadas áreas de la imagen. Pero debemos ajustar nosotros mismos esta área con la ayuda de una herramienta que se basa en ajustar un cubo sobre la zona objetivo. Esta tarea puede realizarse en cualquier fase del levantamiento

⁶Debemos mencionar que hemos trabajado en proyectos donde esas áreas sin interés para levantar pueden ayudar a todo el proceso de alineamiento. Por tanto, deberemos ser nosotros, como técnicos, los que decidimos si la herramienta *Mask* puede ayudarnos o por el contrario perjudicarnos.

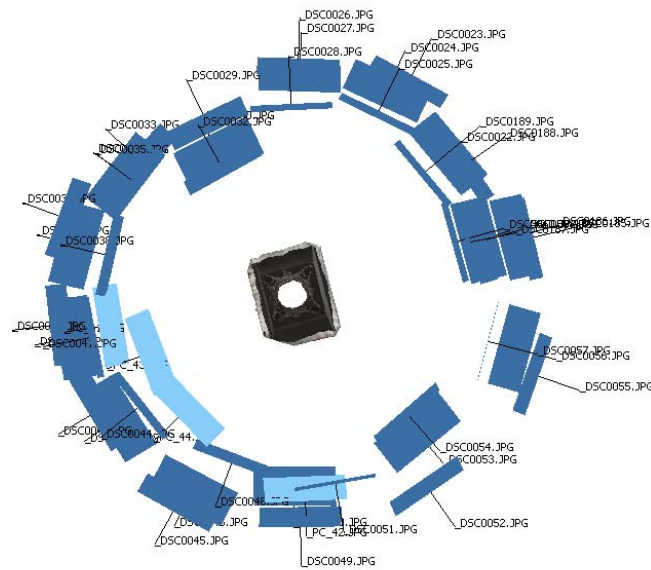


Figura 6.13: Orientación de cada una de las fotografías en capitel P01. Fuente: Autor.

(si lo hacemos en esta primera fase ahorraremos tiempo de ejecución y recursos en las posteriores).

En esta fase de alineamiento obtenemos la información métrica observable en las Figuras 6.13 y 6.14. Para ello se han preestablecidos valores a los siguientes parámetros:

- Accuracy: Ajustándola al valor *high* en nuestro proyecto. Esto nos penalizará en tiempos y consumo de recursos. A cambio obtendremos una alineación de cámaras lo más exacta posible que será la base para las posteriores fases del proyecto.
- Point limit: Desactivando este parámetro. Para ello lo ajustaremos al valor 0.
- Constrain features by mask: Activamos este parámetro para que sean respetadas las áreas de búsqueda en los archivos de imagen. Dichas áreas o máscaras han sido definidas con anterioridad.

El sistema de coordenadas asignado al proyecto es aleatorio a no ser que los archivos de imagen lleven consigo metadatos de geolocalización propios de las cámaras provistas con GPS⁷. Por lo tanto, el siguiente paso será establecer un sistema de referencia local, que no será más que aquel que establecimos gracias a la estación total en las tareas de campo. Este proceso geoposicionará los capiteles

⁷Método empleado en proyectos de fotografía aérea sobre todo.



Figura 6.14: Primera nube de puntos (dispersos) que definen la geometría del capitel P01. Fuente: Autor.

en su ubicación exacta alrededor del patio y, a la vez, nos será de gran utilidad para escalar el modelo y verificar los errores de levantamiento producidos.

El software nos proporciona varias opciones: aplicar las coordenadas de forma manual o importar un archivo ordenado⁸ que contenga la información de las coordenadas.

Lo primero que realizaremos será localizar y *marcar* los puntos de control provenientes de fases anteriores del trabajo mediante la herramienta *marker* (Figura 6.15). Estableceremos los marcadores de posición en todas aquellas fotografías donde se observa el puntero láser de la estación total. El programa nos ayudará posicionando el marcador en las siguientes imágenes donde pueda ser proyectado el punto y nosotros podremos modificar y validar el resultado o por el contrario no hacerlo.

Debemos cambiar el nombre a cada marcador de forma que coincida con el punto XYZ exportado desde la estación total. Esta coincidencia de nombres posibilitará un enlace automático entre marcadores establecidos en el software fotogramétrico y las coordenadas de los puntos importados, en este caso, en formato .txt. Para definir completamente la localización de un marcador es necesario definirlo en al menos dos fotografías.

La importación de las coordenadas de referencia desde la estación total permitirá conocer los errores cometidos en el levantamiento, dará rigor métrico

⁸Disponible la importación en varios formatos. Las más usuales son .txt y .csv.



Figura 6.15: Localización de punto de control (*Marker*. Izq.: Visionado de puntero láser captado en campo. Der.: Localización de punto de control. Fuente: Autor.

al trabajo, escalará los modelos y los situará en su posición espacial real. Los errores del proyectos se muestran milimétricos por lo que la labor que estamos realizando es bastante óptima⁹. Es importante que esta labor sea realizada en el orden que aquí se describe (después del primer alineamiento de cámaras y antes de seguir construyendo el modelo tridimensional) puesto que una optimización del alineamiento se realiza al contener las coordenadas de referencia y, por lo tanto, todo el trabajo posterior cambia en base a esta nueva alineación.

Terminados los trabajos de alineamiento y establecimiento de sistema de coordenadas local, procederemos a seguir construyendo el modelo tridimensional del capitel. Para ello la siguiente fase tiene como objetivo elaborar una nube de puntos densa (Figura 6.16) que defina fielmente la geometría del capitel. En este caso también hemos controlado una serie de parámetros para que la creación de nuestro modelo:

- **Quality:** Existen distintos niveles que permiten una mayor o menor densidad en función de los recursos informáticos y temporales disponibles. En nuestro caso establecemos una calidad alta haciendo prevalecer un resultado detallado sobre recursos y tiempos.
- **Depth filtering modes:** en esta etapa de reconstrucción de la nube densa de puntos Photoscan calcula mapas de profundidad para cada imagen, en nuestro caso al contener nuestras fotografías numerosos pequeños detalles en el primer plano, usaremos un filtro de profundidad leve haciendo prevalecer los detalles en la geometría del capitel.

En la siguiente fase construiremos la TIN¹⁰. El objetivo de esta es crear un modelo tridimensional basado en superficies sobre las cuales proyectaremos las

⁹Un informe dimensional detallado de cada capitel es adjuntado en el presente trabajo.

¹⁰Triangular Irregular Network.



Figura 6.16: Nube densa de puntos que definen la geometría del capitel P01.
Fuente: Autor.

texturas. Del tamaño o área de dichos triángulos dependerá la resolución o grado de detalle que conseguiremos en el modelo final texturizado, sin olvidar la resolución del archivo final de texturas que logremos generar. De nuevo estableceremos los parámetros de forma que esta sea lo más detallada posible haciendo prevalecer la geometría final ante los recursos disponibles.

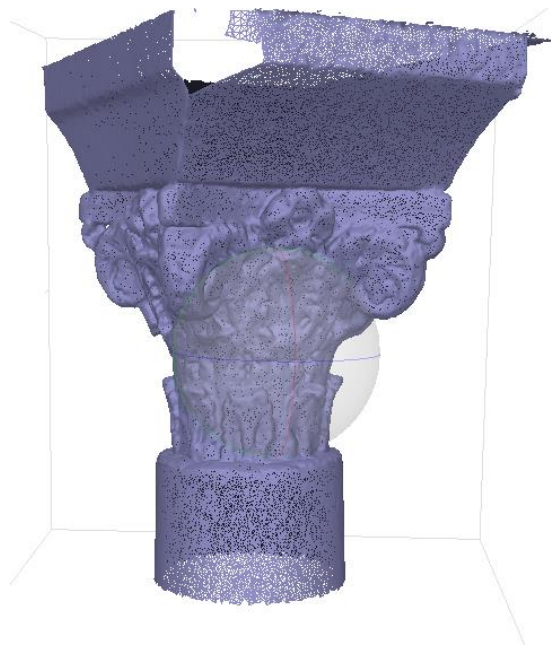


Figura 6.17: TIN generada para el capitel P01. Fuente: Autor.

Dichos parámetros han sido ajustados:

- Surface type: debido a la geometría irregular del capitel, donde ninguna dimensión podemos definirla como claramente predominante, ajustaremos al valor *arbitrary*¹¹.
- Source data: serán los datos generados en la fase inmediatamente anterior, es decir, la nube de puntos densa (Figura 6.16). Parece lógico es item, pero el software posibilita otras opciones para casos extraordinarios.
- Polygon count: estableceremos un valor *high* haciendo prevalecer el detalle final obtenido. Mayor resolución de polígonos permitirá una mayor similitud a la geometría real (Figura 6.18).
- Interpolation: desactivaremos este parámetro puesto que se ha planificado la sesión fotográfica de modo que no existieran datos a extrapolar en la geometría del capitel. Esto nos permitirá verificar que la planificación fue la correcta si todas las áreas han sido cubiertas.

¹¹ *Height field* es idóneo para el levantamiento de terrenos, muy común en la fotogrametría aérea mediante el uso de drone.

- Point classes: lo ejecutaremos con todos los puntos creados puesto que no se observan datos de vegetación u otros gracias a la restricción del escenario para los cálculos (ya establecido en fases anteriores).

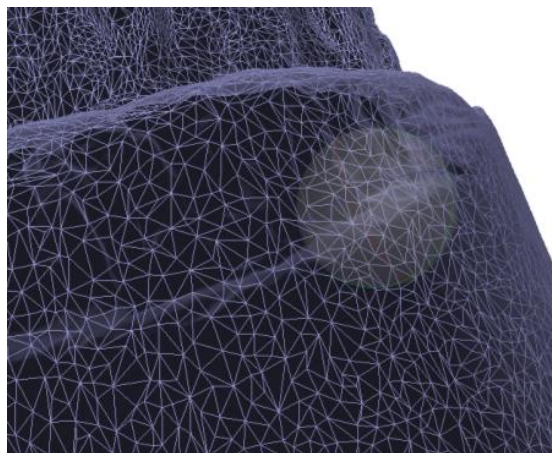


Figura 6.18: Detalle de la TIN generada para el capitel P01. Fuente: Autor.

Por último se procederá a la construcción de las texturas. Este proceso permitirá obtener una visualización final de calidad dependiendo de las imágenes empleadas y la resolución del atlas final. Como ya se ha mencionado, existen varias opciones de mapeado. En el presente proyecto, tras la realización de diversas pruebas, se estima óptimo la utilización del modo genérico, que no asume ningún tipo de geometría definida. En levantamientos del terreno, fachadas de edificios y otro tipo de elementos donde existe un eje predominante, la utilización de este parámetro genérico deber ser reemplazada. Por último, y según la exposición de las imágenes empleadas, debemos ajustar el modo en que el valor RGB es asignado al atlas final. La resolución del atlas final vendrá determinado por la resolución de las imágenes fuente y los requisitos del proyecto. Pero debemos tener en cuenta que, en el caso de que la superficie a levantar sea recogida en su totalidad en cada una de las imágenes, no tiene sentido generar atlas de mayor resolución que las imágenes fuentes pues estaremos consumiendo tiempo y recursos de forma innecesaria sin que el resultado final pueda verse mejorado.

6.3. Resultados gráficos

La digitalización llevada a cabo tiene como resultado la digitalización individualizada de los capiteles posicionados en un mismo sistema de referencia local del patio del Real Alcázar de Sevilla.

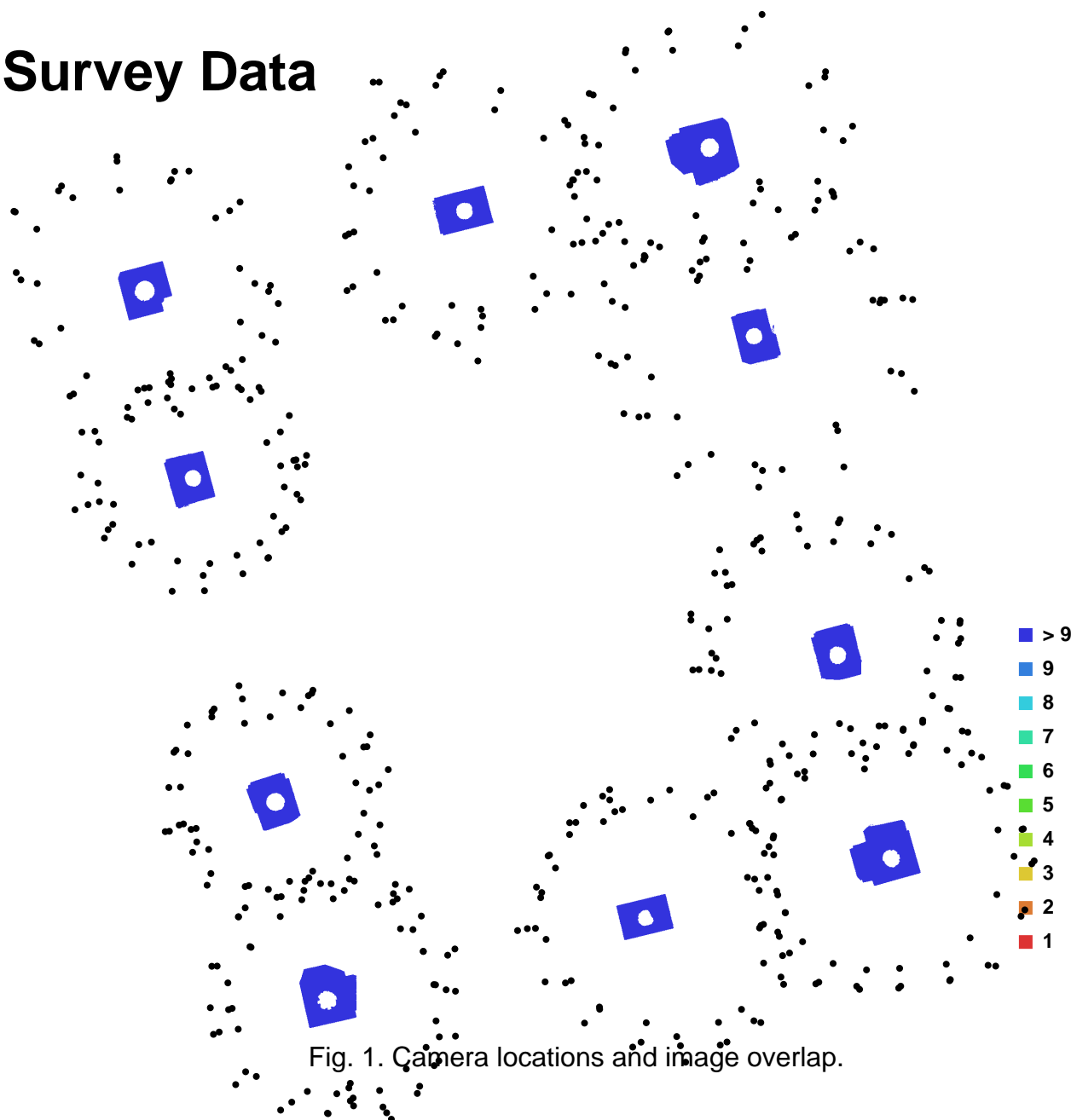
En este enlace puede observarse el modelo 3D:

http://borjamolero.esy.es/patio_munecas.html



Figura 6.19: Imagen de todos los modelos en sistema de referencia local. Fuente: Autor.

Survey Data



Number of images:	545	Camera stations:	541
Flying altitude:	1.06423 m	Tie-points:	1212027
Ground resolution:	0.000190221 m/pix	Projections:	3296360
Coverage area:	1.51902e-006 sq km	Error:	0.560703 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
NIKON D90 (31 mm)	4288 x 2848	31 mm	5.66435 x 5.66435 um	No
NIKON D5100 (35 mm)	4928 x 3264	35 mm	4.92678 x 4.92678 um	No
NIKON D90 (31 mm)	4288 x 2848	31 mm	5.66435 x 5.66435 um	No
NIKON D5100 (35 mm)	4928 x 3264	35 mm	4.92678 x 4.92678 um	No
NIKON D90 (31 mm)	4288 x 2848	31 mm	5.66435 x 5.66435 um	No

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
NIKON D90 (30 mm)	4288 x 2848	30 mm	5.60344 x 5.60344 um	No
NIKON D5100 (35 mm)	4928 x 3264	35 mm	4.92678 x 4.92678 um	No
NIKON D5100 (35 mm)	4928 x 3264	35 mm	4.92678 x 4.92678 um	No
NIKON D90 (30 mm)	4288 x 2848	30 mm	5.60344 x 5.60344 um	No
NIKON D90 (29 mm)	4288 x 2848	29 mm	5.6686 x 5.6686 um	No
NIKON D5100 (35 mm)	4928 x 3264	35 mm	4.92678 x 4.92678 um	No
NIKON D90 (29 mm)	4288 x 2848	29 mm	5.6686 x 5.6686 um	No
NIKON D90 (30 mm)	4288 x 2848	30 mm	5.60344 x 5.60344 um	No
NIKON D5100 (35 mm)	4928 x 3264	35 mm	4.92678 x 4.92678 um	No
NIKON D90 (30 mm)	4288 x 2848	30 mm	5.60344 x 5.60344 um	No
NIKON D90 (29 mm)	4288 x 2848	29 mm	5.6686 x 5.6686 um	No
NIKON D5100 (35 mm)	4928 x 3264	35 mm	4.92678 x 4.92678 um	No
NIKON D90 (30 mm)	4288 x 2848	30 mm	5.60344 x 5.60344 um	No
NIKON D5100 (35 mm)	4928 x 3264	35 mm	4.92678 x 4.92678 um	No
NIKON D90 (30 mm)	4288 x 2848	30 mm	5.60344 x 5.60344 um	No
NIKON D5100 (35 mm)	4928 x 3264	35 mm	4.92678 x 4.92678 um	No
NIKON D90 (30 mm)	4288 x 2848	30 mm	5.60344 x 5.60344 um	No
NIKON D5100 (35 mm)	4928 x 3264	35 mm	4.92678 x 4.92678 um	No

Table. 1. Cameras.

Ground Control Points

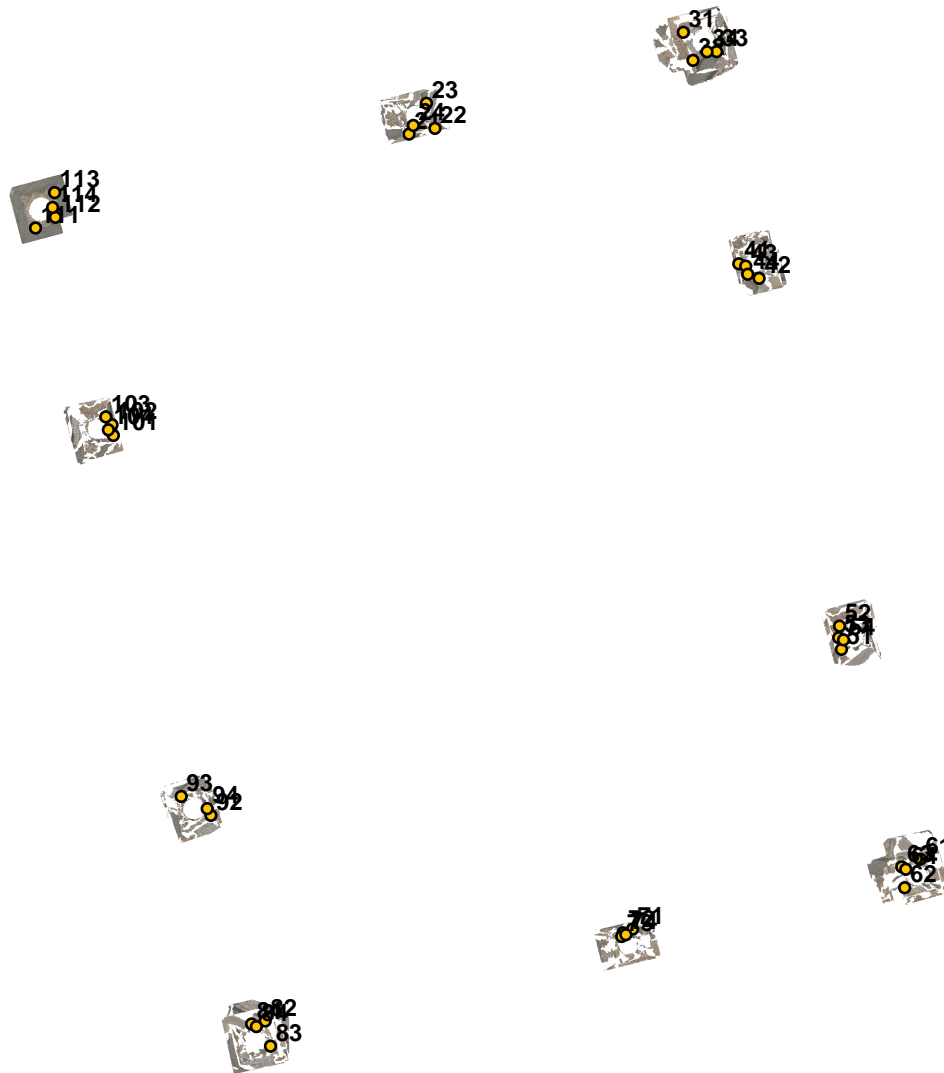


Fig. 2. GCP locations.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
101	0.000763	-0.000445	0.000284	0.000928	7	1.080617
102	-0.000818	-0.000241	-0.000936	0.001266	6	0.818753
103	0.000130	0.001108	0.000056	0.001117	7	0.767544
104	-0.000074	-0.000417	0.000599	0.000734	6	3.297165
111	-0.000140	-0.000369	-0.000062	0.000400	9	0.419334
112	-0.000001	0.000488	0.000523	0.000715	7	0.439889
113	0.000276	-0.000319	-0.000346	0.000545	8	0.236054
114	-0.000134	0.000201	-0.000115	0.000268	7	0.318713
21	-0.001287	0.003321	0.000512	0.003598	7	1.376330
22	0.002735	-0.001056	-0.002139	0.003629	7	1.015721
23	-0.002312	-0.000847	0.002680	0.003639	5	0.393435

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
24	0.000863	-0.001417	-0.001052	0.001965	6	0.883960
31	0.000756	0.000487	0.000170	0.000915	7	1.995582
32	0.001174	-0.000880	0.000280	0.001494	8	0.541520
33	-0.001173	0.000277	0.001785	0.002154	7	2.499206
34	-0.000762	0.000114	-0.002234	0.002363	5	1.640305
41	0.000771	-0.000541	0.000224	0.000968	7	1.549636
42	-0.001413	-0.000588	0.000789	0.001722	7	0.833930
43	-0.001749	-0.000724	-0.000995	0.002139	7	4.680256
44	0.002392	0.001854	-0.000018	0.003026	9	1.363986
51	0.000315	0.000049	0.000330	0.000459	9	0.332305
52	0.000468	-0.000599	-0.000456	0.000886	10	0.892777
53	-0.001349	0.000352	0.000538	0.001494	9	0.916410
54	0.000566	0.000198	-0.000411	0.000727	7	0.705304
61	-0.001086	-0.000537	-0.000056	0.001213	7	1.471228
62	0.000002	0.000078	0.000671	0.000676	7	0.651228
63	0.001318	-0.000013	0.001162	0.001757	6	0.660958
64	-0.000234	0.000472	-0.001777	0.001854	7	4.769934
71	-0.002995	0.002021	-0.001709	0.003997	8	0.853895
72	-0.002230	0.002971	-0.003147	0.004869	7	0.477616
73	0.000516	-0.000277	-0.002480	0.002548	7	0.966473
74	0.002181	-0.000461	-0.002677	0.003484	5	1.403591
81	-0.000025	0.000389	-0.000505	0.000638	8	1.122103
82	-0.000097	0.000482	0.000409	0.000640	8	0.535216
83	0.000071	-0.000312	-0.000497	0.000591	7	1.884422
84	0.000050	-0.000559	0.000594	0.000817	8	0.560162
92	0.001848	-0.000048	0.000366	0.001885	7	4.774516
93	-0.001332	-0.001320	-0.001600	0.002465	10	156.722390
94	-0.000644	0.001628	0.001257	0.002156	9	0.980703
Total	0.001260	0.001040	0.001261	0.002063	285	29.405907

Table. 2. Control points.

Digital Elevation Model

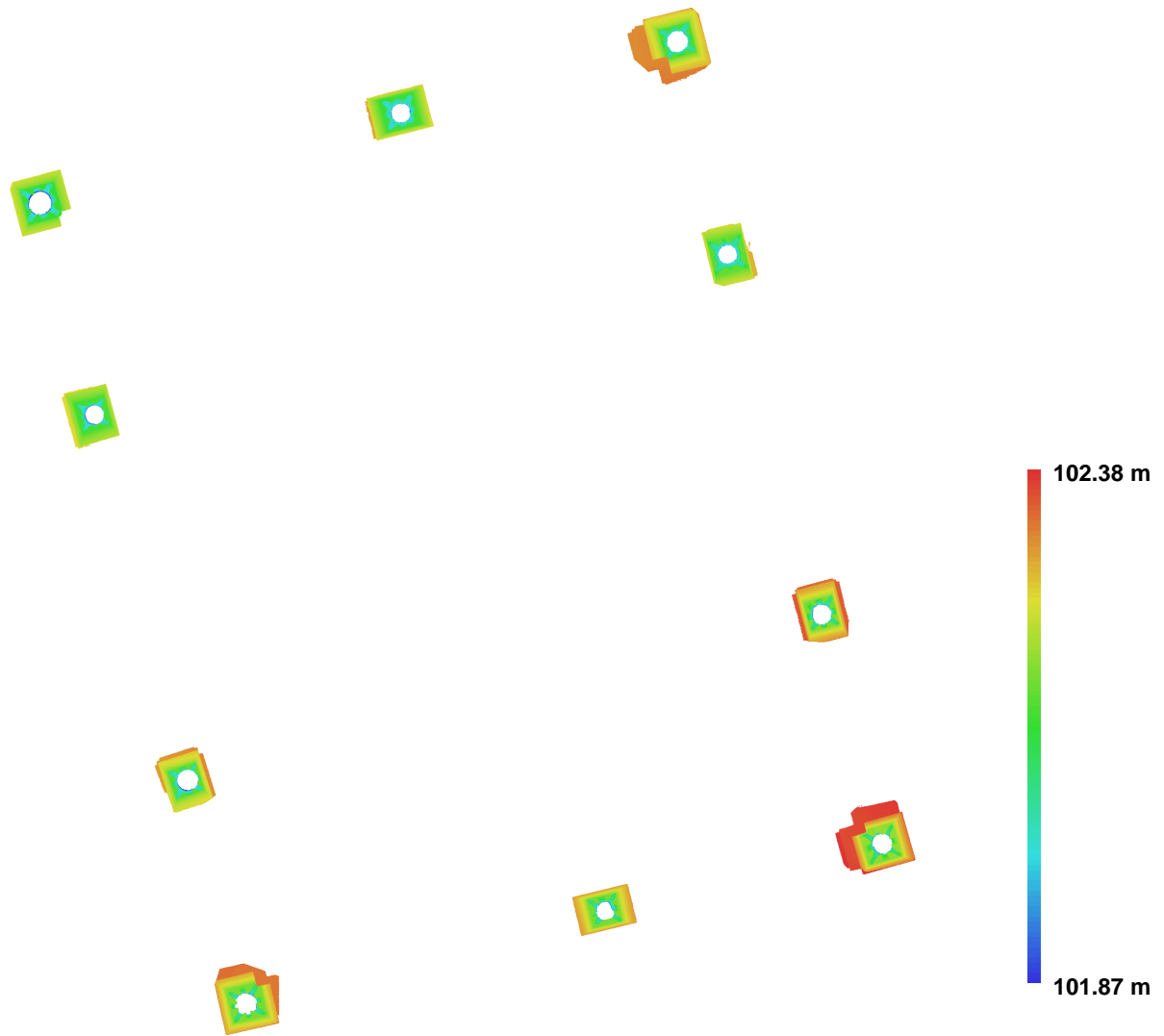


Fig. 3. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.000760884 m/pix
Point density: 1.72728e+006 points per sq m

Parte II

Sistema de Información

Desarrollo del Sistema de Información Geográfica



Capítulo 7

Desarrollo de Sistema de Información Geográfica

7.1. Introducción

En las siguientes líneas explicaremos, paso a paso, la construcción de un sistema de información que permita georreferenciar los modelos 3D digitalizados. El producto que pretendemos obtener en este capítulo es una propuesta de un único sistema de información que permita aglutinar la información geográfica, bibliográfica y geométrica. Todo este tipo de información gestionada desde una misma plataforma podrá aportar geo-análisis históricos, dimensionales, topológicos, etc.:

1. **Información geográfica:** ha sido obtenida a partir de cliente SIG de escritorio¹.
2. **Información bibliográfica:** La información empleada para exponer los resultados en la presente investigación carecen de cualquier validez científica. El único propósito de los textos de carácter bibliográfico han sido exponer a modo de ejemplo el capitel elegido para el presente desarrollo.
3. **Información geométrica**²: ha sido heredada de capítulos anteriores³ de

¹Se ha empleado el software QGIS.

²Ya sea bidimensional y/o tridimensional.

³Capítulo 5.2, Primeros levantamientos. Modelo tridimensional obtenido mediante fotogrametría.

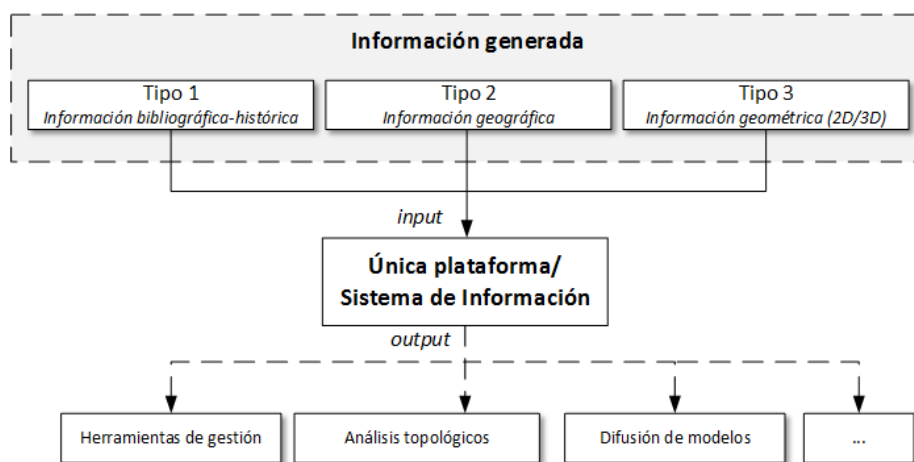


Figura 7.1: Sistema de información propuesto para la gestión de diverso tipo de información: bibliográfica, geográfica y geométrica. Fuente: Autor.

la presente investigación.

Además de las posibilidades de almacenamiento de información, creemos que el máximo potencial de estas plataformas SIG radica en la combinación de estas herramientas de registro junto con el análisis espacial que pueden ofrecer, pudiendo abarcar desde la documentación del patrimonio para su puesta en valor, hasta la resolución de hipótesis complejas en investigación arqueológica. Es decir, no solo permiten un *input* de información, sino también un interesante y valioso *output* a manos de expertos. Para la elaboración de los siguientes apartados nos basamos en estudios e investigaciones realizados en base a SIG y que obtienen importantes conclusiones gracias a sus aplicaciones [58].

Se expone un ejemplo de registro espacial de los capiteles digitalizados en fases anteriores de esta investigación. Toda la información literaria que acompaña a los modelos tridimensionales proviene de meros ejemplos o invenciones. La finalidad es ilustrar la experiencia del desarrollo de la plataforma SIG como herramienta para el estudio de las evidencias arqueológicas a diversas escalas:

- Escala micro: posibilidad de analizar cada elemento de estudio a través del registro espacial, literario y geométrico por individualizado.
- Escala macro: posibilidad de realizar análisis topológicos que permitan responder a cuestiones de organización territorial, distribución superficial (densidades de elementos), captación de recursos, procedencia de elementos, vías de transporte y otras cuestiones del ámbito arqueológico (en las cuales no es objetivo entrar en la presente investigación).

¿Por qué se optó por una base de datos espacial? Tras varias reuniones mantenidas con investigadores pertenecientes al Departamento de Prehistoria y Arqueología, se llega a la conclusión que la componente espacial juega un papel prioritario en el análisis histórico [66].

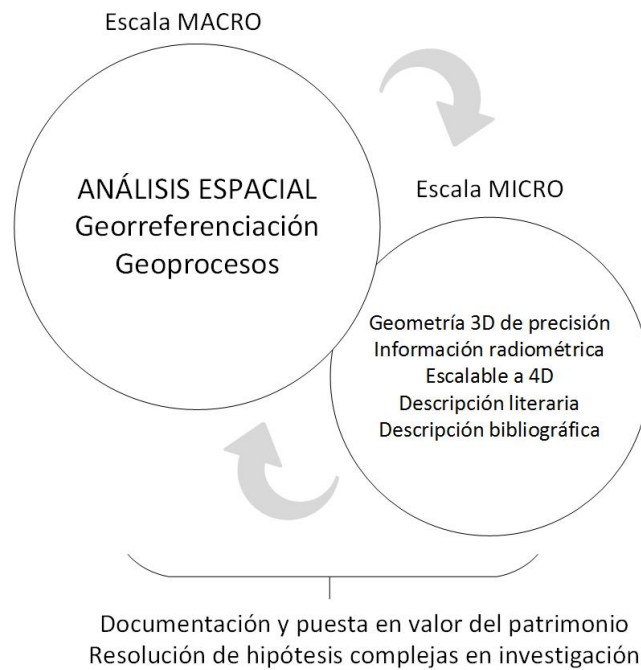


Figura 7.2: SIG como fundamento metodológico. Fuente: Autor.

Exponemos el desarrollo de la base de datos con información geográfica, desde su esquema base para la creación hasta el código desarrollado⁴.

7.2. Desarrollo de Base de Datos Espacial con PostgreSQL y PostGIS

Además del sistema gestor de bases de datos PostgreSQL con la extensión PostGIS, se ha empleado el SIG de escritorio llamado QGIS y el visualizador web CartoDB. Serán los tres software de base para nuestro desarrollo.

1. **PostGIS** da soporte espacial a la base de datos relacional permitiendo a **PostgreSQL** la capacidad de almacenar, consultar y manipular datos espaciales. De este modo, PostgreSQL se encarga de las funciones gene-

⁴El código desarrollado puede ser consultado en los Anexos.

rales en las bases de datos, y la extensión PostGIS de las funcionalidades espaciales adicionales que le proporciona.

2. **QGIS** ha sido empleado en la consecución y transformación de coordenadas para nuestro capitel de ejemplo. También ha sido el software encargado de crear las geometrías que representarán nuestro capitel. En este caso, hemos empleado geometría tipo punto individualizado.
3. Por último, **CartoDB** nos ayudará a renderizar la base de datos espacial para ser publicada vía web.

Una vez definida la hoja de ruta pasaremos a detallar, paso a paso, las tareas realizadas para el desarrollo de la base de datos espacial.

7.2.1. Inicios con PostGIS

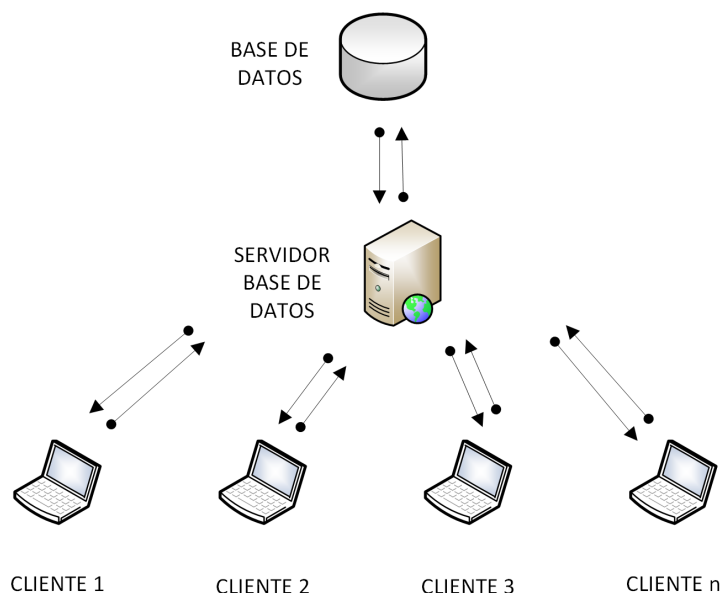


Figura 7.3: Esquema de la arquitectura cliente-servidor en una base de datos. Fuente: Autor.

La versión más reciente de PostGIS ya viene en un mismo paquete con el Sistema Gestor de Bases de Datos PostgreSQL y se instala como una extensión opcional. La versión estable en el momento de desarrollar la propuesta que presentamos aquí es la v2.1. En esta investigación hemos trabajado en entorno MS Windows, pero existen compilaciones del software para los sistemas operativos de Mac y Linux. Es posible la visualización de los datos almacenados en PostGIS de forma geográfica en multitud de software libre: como QGIS⁵, gvSIG

⁵<http://www.qgis.org/es/site/>

⁶, uDIG⁷, OpenJUMP⁸ o Kosmo⁹ son algunos de ellos. Por supuesto, también existe la posibilidad del software propietario, como el extendido ArcGIS¹⁰ de ESRI.

La instalación de PostGIS requiere de varios factores que debemos tener presente:

1. PostGIS no es más que una extensión de tipo espacial para el DBMS¹¹ PostgreSQL, por lo tanto es necesaria la instalación previa de éste.
2. La instalación de PostgreSQL se puede realizar de forma totalmente automática mediante las distribuciones binarias de instalación descargables desde la sección de descargas del sitio web¹².

Por otro lado, la interacción humano-DBMS requiere de un Cliente SQL. Existen varios tipos de clientes pudiendo clasificarse, en general, en clientes de texto y clientes gráficos. Nos hemos provisto del cliente de texto *psql* y el cliente gráfico *pgAdminIII*. El motivo ha sido que son éstos los que nuestra versión de PostgreSQL instala por defecto y cumplirán de sobra con las tareas para desarrollar nuestra propuesta. Ambos han sido empleados de forma aleatoria, aunque cabe destacar la amigabilidad de uso mostrada por el cliente *pgAdminIII*.

Una vez realizada la instalación de PostgreSQL y los clientes SQL, es posible realizar la instalación de PostGIS de forma sencilla. Para ello podemos emplear un programa denominado *Stack Builder*, accesible desde el directorio PostgreSQL en el menú inicio (MS Windows). Teniendo en cuenta que la extensión PostGIS estará dentro de la sección denominada *Spatial Extensions*, basta con instalarla y podremos comenzar a trabajar con ella.

7.2.2. Arquitectura del Sistema Gestor de Base de Datos

A continuación, exponemos el modelo de datos desarrollado para la creación de nuestra base de datos. Tanto el modelo de datos como la posterior base de datos se encuentran en fase de desarrollo y, por tanto, corresponde solo a una primera propuesta que obedece a criterios meramente académicos dentro del ámbito de nuestra investigación.

Aclarado este punto, podemos resaltar que se ha dividido el diseño de la BD en diseño conceptual, diseño lógico y diseño físico conforme a bibliografía sobre bases de datos [59]. Para esta tarea nos hemos apoyado en el Modelo Entidad/Interrelación (*Entity/Relationship Model* o *ERM*).

⁶<http://www.gvsig.org/web>

⁷<http://udig.refrains.net/>

⁸<http://www.openjump.org/>

⁹<http://www.opengis.es/>

¹⁰<http://www.esri.es/es/productos/arcgis/>

¹¹Database Management System.

¹²Enlace de descarga de PostgreSQL: <http://www.postgresql.org.es/descargas>.

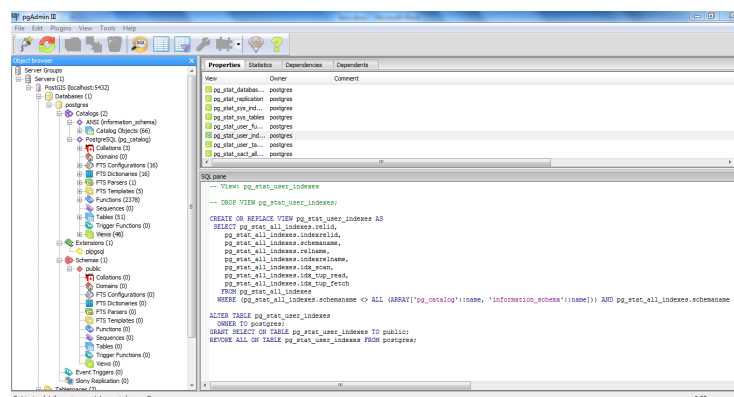


Figura 7.4: Interfaz gráfica para la gestión de bases de datos PostgreSQL/Post-GIS a través de pgAdminIII. Fuente: Autor.

- En un primer **nivel conceptual** describiremos la realidad en un alto nivel de abstracción mediante un mapa conceptual donde queden reflejados las entidades, los campos y sus relaciones. Este primer nivel nos permite obtener una visión muy general de la BD para, en posteriores tareas, seguir definiendo aspectos más concretos: (Ver Figura 7.5).
- Según bibliografía [59], en un segundo nivel de desarrollo, **nivel lógico**, se definen sobre unas reglas básicas de integridad de la base de datos (Apartado de anexos 10.1.1).
- Por último, en el **esquema físico** definiremos la organización física de la base de datos, con el cual podemos proceder a desarrollarla (en este caso en lenguaje SQL) de forma sencilla (Apartado de anexos 10.1.2).

7.2.3. Programación SQL de la Base de Datos

Para la creación de la base de datos de nuestro proyecto se empleará el código SQL oportuno, donde “capiteles” será el nombre de nuestra base de datos. Pero, como ya hemos mencionado, necesitaremos de la extensión espacial PostGIS, cuyos complementos ejecutaremos inmediatamente después de la creación de la base de datos¹³.

A partir de este momento, son creadas dos nuevas tablas en nuestra base de datos. Estas tablas son empleadas por PostGIS para almacenar información de carácter espacial:

- *spatial_ref_sys*

¹³Todo el código que se menciona en este apartado queda desarrollado por menorizado en el Capítulo Anexos.

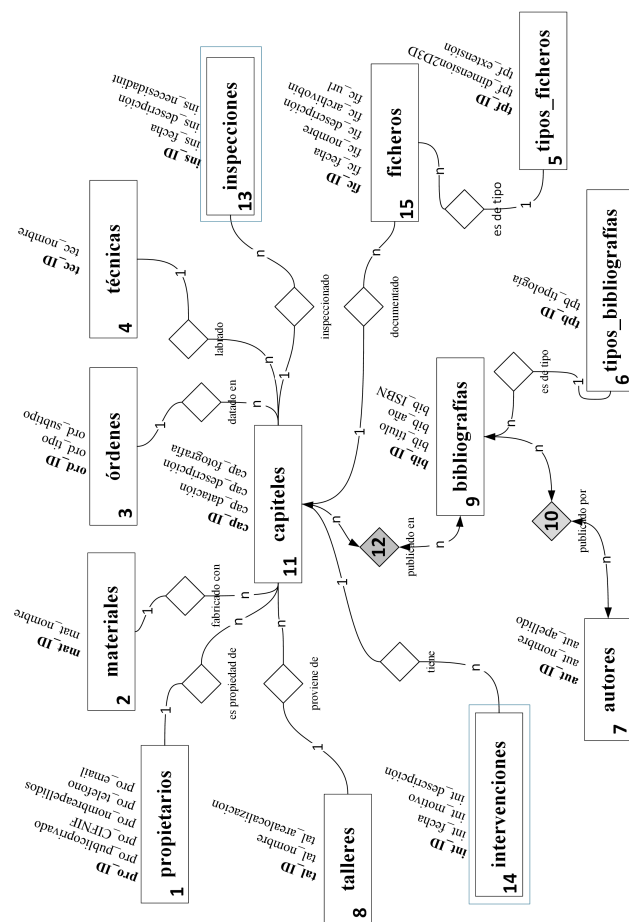


Figura 7.5: Modelo conceptual de la base de datos desarrollada. Fuente: Autor.

- *geometry_columns*

1. La tabla *spatial_ref_sys* almacena información de sistemas de referencia espaciales.
2. La tabla *geometry_columns* se encarga de decirle a PostGIS que tablas de nuestra base de datos tienen función espacial.

La creación de una tabla espacial para almacenar geometrías es similar a la creación de una tabla normal, con la excepción de que hay que definir un campo donde se almacena las geometrías. Como hemos mencionado, esta plataforma ya utiliza la tabla *spatial_ref_sys* por defecto conteniendo información descriptiva sobre los sistemas de coordenadas soportados por PostGIS, normalmente denominados como Coordinate Reference System (en adelante CRS). Dicha tabla es creada por el complemento PostGIS, o bien mediante la secuencia SQL oportuna. Sus columnas son un total de cinco:

- Columna SRID: Define el identificador de cada CRS. Éste es el valor utilizado por PostGIS.
- Columna AUTH_NAME: Será el nombre del estándar utilizado, como por ejemplo “EPSG”.
- Columna AUTH_SRID: Es el identificador CRS según el estándar utilizado.
- Columna SRTEXT: Representa el CRS en formato ASCII estandarizado, diseñado para describir objetos espaciales expresados de forma vectorial, conocido como WKT¹⁴.
- Columna PROJ4TEXT: Representa el CRS según el formato utilizado, para su proyección según la biblioteca PROJ4¹⁵.

En las últimas versiones de PostGIS, esta tabla contiene más de 3900 registros, es decir, CRS distintos, casi todos con el estándar EPSG¹⁶. En todos los registros el valor del campo *SRID* coincide con el valor del campo *AUTH_SRID*. Es posible la edición o añadir CRS a la tabla *spatial_ref_sys*.

En PostGIS existe una vista de metadatos¹⁷ que contiene información descriptiva sobre las geometrías de todas las columnas que existen en la base de datos, denominada *geometry_columns*.

Una vez aquí, podemos comenzar a crear las tablas de nuestra base de datos, guardando unas reglas de integridad básicas que eviten errores de relaciones en la creación de tablas.

¹⁴ “Well-Known Text”. Más información: <http://www.geoapi.org/3.0/javadoc/org/opengis/referencing/doc-files/WKT.html>

¹⁵ <http://trac.osgeo.org/proj/>

¹⁶ Los códigos EPSG de los CRS pueden ser consultados desde la página web del OGP Geomatics Committee: <http://www.epgs.org/>.

¹⁷ En versiones anteriores a la 2.0 estos metadatos se mostraban en una tabla, en lugar de una vista.

Las tablas son definidas en detalle una a una en las siguientes líneas. El procedimiento general es el siguiente: la orden de inicio o creación de tabla es “create table”, seguido del nombre de la tabla. Posteriormente, y entre paréntesis, se definen cada una de los campos que componen la tabla (nombre de la columna, tipo de dato y los vínculos para la integridad de la columna). Puede consultarse el ejemplo desarrollado en el Capítulo Anexos.

1. El nombre de la columna identificará de forma inequívoca e individualizada los registros que se almacenan en el atributo. No podrá tener duplicidad en la base de datos.
2. El atributo definido con el tipo de dato podrá ser de un origen diverso (serial, character varying, boolean, date, etc.).
3. Para terminar de definir nuestra tabla debemos establecer unas reglas de integrar a nivel de columnas. Estos vínculos se definen con la orden “constraint” (“primary key”, “foreign key”, “unique”), indicando un identificador o nombre de la llave y el campo deseado.

Una vez modelada la base de datos, creada en PostgreSQL, ejecutada la extensión espacial PostGIS y desarrolladas las tablas y sus interrelaciones podemos pasar a la inserción de datos mediante la orden “insert into [...] values”. Para insertar un registro se definirá la tabla de inserción, los campos deseados de dicha tabla y, tras el comando “values”, los datos.

Finalizada esta fase, podemos afirmar que la base de datos con funciones espaciales ha sido creada y ha sido creada información. Pero parece conveniente aclarar que aún ni la información de carácter espacial ni la geometría que representa los elementos sobre la cartografía ha sido insertada. Por supuesto, podría haberse realizado dicha inserción de datos en el paso anterior añadiendo a una (o varias) tabla las coordenadas y la geometría (por convención se emplea la definición “the_geom” como campo para la inserción de esta información) mediante Well-Known Text (WKT)¹⁸.

Este podría ser un ejemplo:

```
1 INSERT INTO capiteles (id, the_geom, name) VALUES (001,
  ST_GeomFromText('POINT(21.5632 32.301)',4326),
  capitel_001');
```

Donde “capiteles” sería el nombre de la tabla y estaríamos insertando un “point” en el sistema de referencia con identificador EPSG 4326.

En cambio, hemos preferido realizar estas tareas con la ayuda de un software Sistema de Información Geográfica libre y muy difundido llamado QGIS.

¹⁸A efectos prácticos la sintaxis WKT consta de una descripción de los vértices que componen la geometría. Para que esta forma de especificar las geometrías tengan sentido deben de acompañarse de una indicación de la referencia espacial o proyección cartográfica utilizada.

Los tipos de geometrías que PostGIS soporta son multitud, incluido curvas o superficies TIN, pero principalmente nos interesan aquellos en los que se apoya cualquier SIG de escritorio: punto, línea, polígono o la combinación múltiple de ellos. En nuestro proyecto parece lógico centrarse en las geometrías de tipo punto por las dimensiones de nuestros objetos de estudio.

Para la creación e inserción de geometrías en PostGIS se puede utilizar la definición de texto WKT, como ya hemos mencionado, o la versión binaria WKB mediante los constructores *ST_Geomfromtext* y *ST_Geomfromb*, respectivamente.

En el caso de los mapas de puntos, las propiedades geométricas son mínimas (dos o tres coordenadas, según trabajemos con información planimétrica o 3D) y las topológicas inexistentes. Lo más habitual es utilizar el SGBD¹⁹ para almacenar la información temática y el SIG para la información geométrica y topológica²⁰. El mayor interés del modelo geo-relacional estará en poder lanzar una consulta SQL y obtener una o varias entidades espaciales (en lugar de número, tabla o fila) como respuesta. Para ello debe enlazarse la base de datos espacial (mapa vectorial) con la base de datos temática (tablas del SGBD) mediante una columna en una de las tablas de la base de datos que contenga los mismos identificadores que las entidades en la base de datos espacial.

7.2.4. Generación de vistas

Antes de pasar a detallar los trabajos realizados en el software GIS ha sido conveniente implementar una serie de “vistas” en nuestra BD con la finalidad de obtener una tabla final de datos que aglutinase y mostrara toda la información que hemos estimado oportuna. En definitiva, se trata de almacenar determinadas consultas espaciales que por un determinado motivo podemos considerar importantes²¹. Por supuesto se pueden crear todas las vistas que se deseen y que las necesidades del trabajo requieran, e insistimos que este tipo de detalles post-desarrollo de la base de datos son meramente a modo de ejemplo para la presentación de la idea propuesta en nuestro proyecto. Dicho esto exponemos el código SQL empleado para el desarrollo de las vistas implementadas en nuestra base de datos. Han sido un total de cuatro, que mostrarán información focalizada sobre los capiteles en general, sobre sus ficheros de documentación gráfica y sobre las intervenciones e inspecciones realizadas a los capiteles:

Donde primero se define el nombre de la vista, seguido de las columnas a listar especificando la tabla que la contiene y, por último, se establecen las relaciones entre los registros de las distintas tablas empleadas para crear la vista.

¹⁹Sistema Gestor de Bases de Datos

²⁰No es objeto del presente escrito profundizar en materia relativa a los SIG. Por ello, estimamos que el lector tiene conocimiento de las relaciones topológicas de estos sistemas.

²¹Los registros que han sido incluido en estas vistas han sido seleccionados bajo criterios de desarrollo. Dichas vistas pueden ser fácilmente modificadas para su adaptación bajos los criterios de especialistas en la materia, por ejemplo, arqueólogos.

7.3. Creación de geometrías con QGIS

QGIS es el software que mejor soporte y comportamiento tiene respecto a PostGIS. (REFERENCIA A LIBRE GIS). Es el software libre preferido para trabajar con PostGIS por sus características y experiencia con esta extensión de PostgreSQL ya que fue uno de los primeros en soportarlo. Además, cuenta con un interesante complemento llamado “PostGIS Manager” que permite tareas cotidianas de tablas y columnas de forma eficaz.

La elección de QGIS se ha debido a diversos factores como: software abierto, compatibilidades con PostGIS, aceptación internacional en el ámbito profesional, gran evolución y desarrollo en los últimos años, gran comunidad activa, facilidad de uso²². A continuación describiremos el trabajo elaborado en el software de escritorio QGIS.

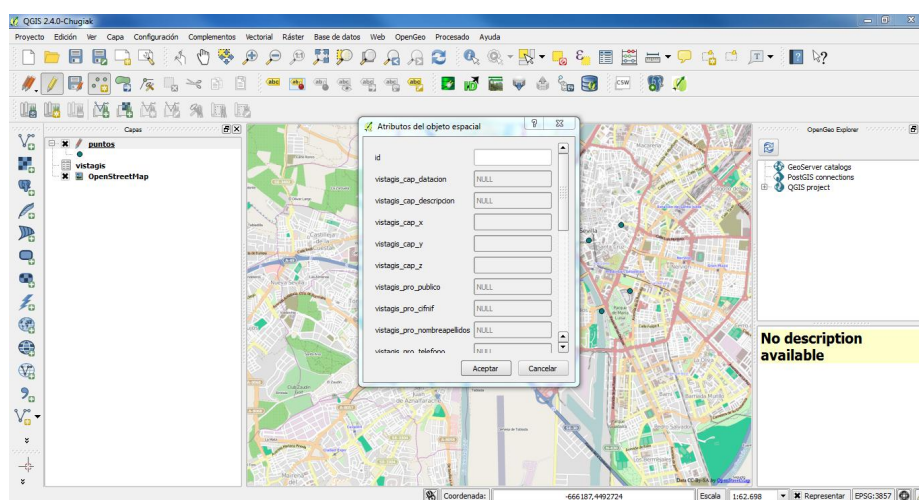


Figura 7.6: Interfaz gráfica del software de escritorio QGIS con visionado de la conexión a la base de datos. Fuente: Autor.

Tras ejecutar el software, inicializamos un nuevo proyecto. En primer paso es realizar la conexión entre nuestro cliente SIG y la base de datos PostgreSQL. Para ello añadiremos una capa PostGIS desde el menú “capa” de QGIS. La conexión se realiza de forma rápida y sencilla gracias al soporte entre ambas plataformas. Debemos aportar los datos necesarios de servidor, puerto, nombre de la base de datos, usuario y contraseña de PostgreSQL. Dicha conexión debe realizarse listando las tablas sin geometría, puesto que, como hemos apuntado anteriormente, vamos a tomar la opción de añadirla sobre el cliente SIG en lugar de usar WKT sobre el SGBD. Una vez realizada la conexión añadiremos la vista o tabla deseada. En nuestro caso, hemos añadido una vista que muestra las principales características de los capiteles así como su documentación gráfica 3D²³.

Para la creación de la geometría añadiremos una nueva capa vectorial, en

²²Esta información ya ha sido aportada en apartados posteriores. Véase Apartado??.

²³Podrán ser añadidas el numero de vistas que el proyecto requiera.

nuestro caso, del tipo **punto** para la representación de los capiteles sobre la cartografía. Finalmente realizamos una unión donde el atributo común será el identificador asignado a cada capitel y podemos comenzar con la digitalización de la capa.

Finalizada la fase de desarrollo podemos almacenar toda la información sobre la geodatabase, o bien desde el propio cliente SIG o mediante el SGBD. Para la importación del fichero *shape* a la base de datos en PostGIS existe la utilidad *shp2pgsql*. En sentido contrario, es decir para la importación de tablas PostGIS a clientes SIG en formato *shape*, encontramos la funcionalidad *pgsql2shp*. Estos comandos pueden ejecutarse sobre la consola o bien desde la interfaz gráfica disponible desde la version 1.5 (*shp2pgsql-gui*).

7.4. Visor de mapas web con CartoDB

Una vez elaborada toda la información espacial, podemos visualizarla a través del software GIS de escritorio de forma local. Este mismo tipo de software nos permite realizar los interesantes geoprosesos que deseemos. Recordamos que esta es una de las principales finalidades de poseer dicha información espacial estructura dentro de un SIG. Como último paso queremos ofrecer la información de todas estas capas a los potenciales usuarios. Para ello crearemos un visor web con ayuda de CartoDB que hará las funciones de renderizado. Por supuesto, en dicho visor podrán ser incluidas tantas capas procedentes de los geoprosesos como deseemos.

El proceso ha comenzado con la exportación a un formato compatible con la plataforma CartoDB desde PostGIS. El formato elegido ha sido GeoJSON²⁴. Este formato permite geometrías como puntos, (multi)líneas y (multi)polígonos. En nuestro proyecto la geometría es simple: serán puntos (cada punto representará un capitel).

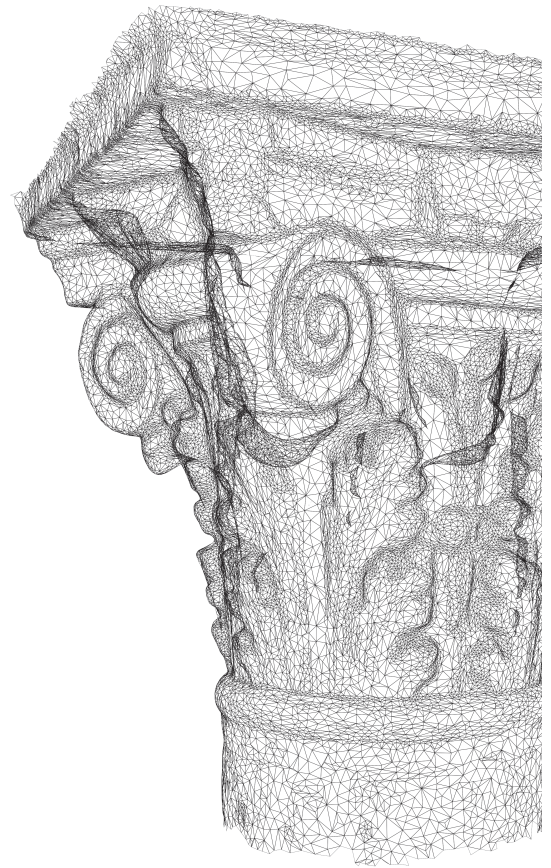
EL archivo *".geojson"* es importando en CartoDB y tras un rápido ajuste de caracter gráfico y relleno de metadatos la publicación a sido llevaba a cabo gracias a un código embebido en el HTML.

²⁴Otros formatos disponibles son: Shapefile, KML, CSV, GPX, etc.

Parte III

Difusión

Publicación online de resultados



Capítulo 8

Publicación online de resultados

8.1. Del modelo tridimensional

La correcta difusión precisa de un estudio profundo de las posibilidades de visualización de la multitud de formatos existentes, así como otros factores (plataformas, requerimientos informáticos,...). La informática actual ya permite esta difusión de forma simple. Comenzando por el campo profesional existen multitud de gestores de información 3D que permiten la carga de formatos abiertos, así como multitud de visores de propietario que permiten su uso de forma abierta. No es motivo del presente estudio realizar un análisis del amplio abanico de software profesional disponible.

Analizando el escenario de difusión para dar soporte al público, existen un gran número de plug-ins para su instalación en el navegador web que permiten la visualización 3D (como Cortona, OpenVRML), si bien actualmente la mayoría de navegadores soportan WebGL (Internet Explorer v.11, Google Chrome, Mozilla Firefox, Opera, Safari) y es posible la visualización tridimensional desde repositorios 3D (como Sketchfab, Smithsonian X3D o p3D.in) sin la instalación de plug-ins adicionales. La filosofía seguida en dichas plataformas no es distinta de tantas otras aplicaciones web¹: en primer lugar, requieren de un registro de

¹Esta filosofía se repite de forma sistemática en la web y en multitud de campos. Por ejemplo, con el gestor de bibliografías Mendeley o la aplicación SIG CartoDB, por nombrar algunos.

usuario vinculado a una dirección de correo electrónico². Este proceso da como resultado una cuenta gratuita, normalmente con límite de espacio o de número de cargas de modelos 3D. Para poder acceder a la herramienta sin restricciones es necesario realizar pagos. Pero existen alternativas con las que podemos crear nuestras propias plataformas visores web mediante el uso de librerías JavaScript³.

También parecen obvias las vías de difusión tridimensional del patrimonio que abre el formato PDF3D o el soporte aportado por la herramienta Adobe PhotoShop. La primera, por su globalización y sencillez de uso, llegando incluso un paso más allá de la pura visualización (es posible realizar secciones o mediciones). Mientras que PhotoShop permite la visualización de modelos 3D codificados en wavefront file y su edición a nivel de texturas. Esto permite nuevas vías de trabajo en aquellos proyectos que requieren modificaciones de aspecto de los modelos 3D finales.

Retomando la posibilidad de generar nuestro propio visor de modelos 3D desarrollado a partir de librerías JavaScript, debemos mencionar que son una interesante alternativa. En nuestro proyecto se ha empleado la librería JSC3D⁴. Ofrece un visor de objetos 3D para la presentación de los modelos y escenas en una página web. JSC3D se codifica enteramente en Javascript y requiere canvas HTML para llevar a cabo la representación y las interacciones. Está especialmente diseñado para compartir en línea los productos, en este caso modelos tridimensionales. Es compatible con los navegadores más extendidos que soportan HTML5. JSC3D ha sido probado en Opera, Chrome, Firefox, Safari y IE9, entre otros. Esta librería JavaScript open source da soporte a extensiones tan comunes en el ámbito del modelado como OBJ, STL y 3DS, entre otras.

De forma similar trabajan librerías como Three.js⁵ o X3DOM⁶. Su sencillez de código sumado a los buenos resultados de renderizado y la librería de apoyo a WebGL hacen de este tipo de herramientas de una ayuda inestimable para contribuir a la fase de difusión en nuestros proyectos. Nos permiten hacer llegar modelos 3D sin la necesidad de que los receptores de esta información tenga que instalar un software adicional.

El código HTML, que a continuación se detalla se basa en el habitual objeto *canvas* para la carga de las librerías básicas *jsc3d.js*, *jsc3d.touch.js*, *jsc3d.webgl.js*.

```
<canvas id="cav" width="640" height="420" ></canvas>
  <script type="text/javascript" src="jsc3d/jsc3d.js">
    </script>
  <script type="text/javascript" src="jsc3d/jsc3d.
    touch.js"></script>
  <script type="text/javascript" src="jsc3d/jsc3d.
```

²O vinculación rápida con plataformas sociales. Este tipo de vinculación da a su vez difusión a la aplicación de publicación de modelos 3D en la web.

³Comúnmente abreviado como "JS".

⁴Código *open source* disponible en: <https://code.google.com/p/jsc3d/>.

⁵Código *open source* disponible en: <http://threejs.org/>.

⁶Código *open source* disponible en: <http://www.x3dom.org/>.

```
webgl.js"></script>
```

A continuación definiremos el objeto *canvas*:

```
var canvas = document.getElementById('cav');  
var viewer = new JSC3D.Viewer(canvas);
```

Ejecutamos el *viewer* y enlazamos nuestro modelo 3D (en este caso en formato OBJ):

```
viewer.setParameter('SceneUrl', 'modelo3d/capitel_60000faces  
.obj');
```

Tenemos que aclarar que en el caso que nuestro modelo 3D tenga asignadas texturas definidas a través del uso del archivo MTL, éste debe ser nombrado con el mismo nombre que nuestro archivo OBJ.

Ajustamos distintos parámetros del *viewer*, como la posición inicial del modelo en nuestra escena, el color de fondo o el modo de renderizado⁷, entre otros. Y, finalmente, tras iniciar la escena podremos visualizar el modelo 3D desde cualquier navegador:

```
viewer.setParameter('InitRotationX', -90);  
viewer.setParameter('InitRotationY', 0);  
viewer.setParameter('InitRotationZ', 0);  
viewer.setParameter('BackgroundColor1', '#000000');  
viewer.setParameter('BackgroundColor2', '#000000');  
viewer.setParameter('RenderMode', 'texturesmooth');  
viewer.setParameter('MipMapping', 'on');  
viewer.setParameter('ProgressBar', 'on');  
viewer.setParameter('Renderer', 'webgl');  
viewer.init();  
viewer.update();
```

A continuación, los enlaces los visores generados:

- <http://borjamolero.esy.es/index.html>

⁷El modo de renderizado permite: *point*, *wireframe*, *flat*, *smooth*, *texture*, *textureflat* y *texturesmooth*.

- http://borjamolero.esy.es/patio_munecas.html

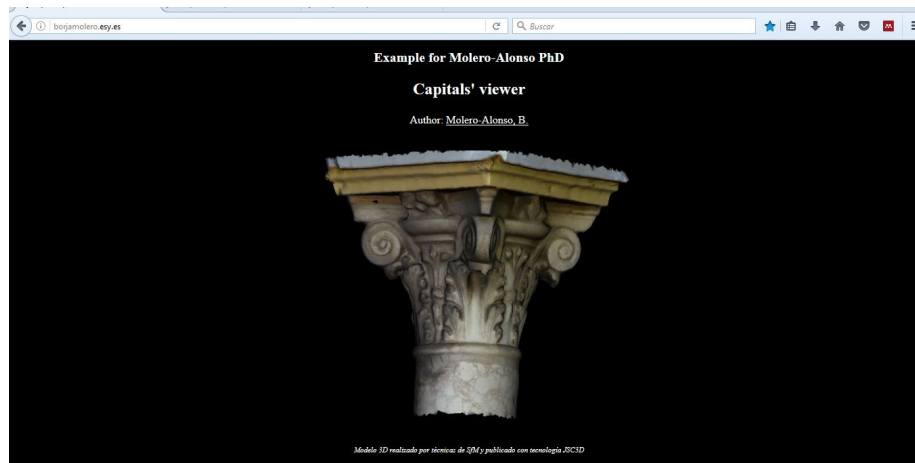


Figura 8.1: Imagen del visor de modelo generado. Fuente: Autor.

8.2. Del sistema de información geográfica

La publicación de la base de datos desarrollada en apartados anteriores se ha llevado a cabo con el soporte de CartoDB (plataforma que proporciona herramientas SIG y web mapping para su publicación online).

El proceso ha comenzado con la exportación a un formato compatible con la plataforma CartoDB desde PostGIS. El formato elegido ha sido GeoJSON⁸. Este formato permite geometrías como puntos, (multi)líneas y (multi)polígonos. En nuestro proyecto la geometría es simple: serán puntos (cada punto representará un capitel).

EL archivo ".geojson" es importando en CartoDB y tras un rápido ajuste de caracter gráfico y relleno de metadatos la publicación a sido llevaba a cabo gracias a un código embebido.

A continuación, el enlace al visor generado:

- http://borjamolero.esy.es/index_visor.html

⁸Otros formatos disponibles son: Shapefile, KML, CSV, GPX, etc.

capiteles_geodatabase									
Edit metadata...									
DATA VIEW					MAP VIEW				
cartodb_id	the_geom	datacion	descripcion	dni_cif	email	id	material	nombre	
number	geometry	string	string	string	string	number	string	string	
1	-6.0467, 37.4423	1000-1100	Capitel ubicado en el Real Alcázar de Sevilla, e...	null	actividades@patronato-alcazarsevilla.es	1	PÁlmez	Real Alc	
2	-5.9909, 37.3840	1500-1600	Capitel ubicado en...	44221510P	pedrosan@email.es	17	Basalto	Pedro S	
3	-5.9912, 37.3840	1500-1600	Capitel ubicado en...	44221510P	pedrosan@email.es	16	Basalto	Pedro S	
4	-5.9913, 37.3835	1500-1600	Capitel ubicado en...	44221510P	pedrosan@email.es	15	Basalto	Pedro S	

Figura 8.2: UI de la plataforma CartoDB mostrando la base de datos GeoJSON importada desde PostGIS. Fuente: Autor.

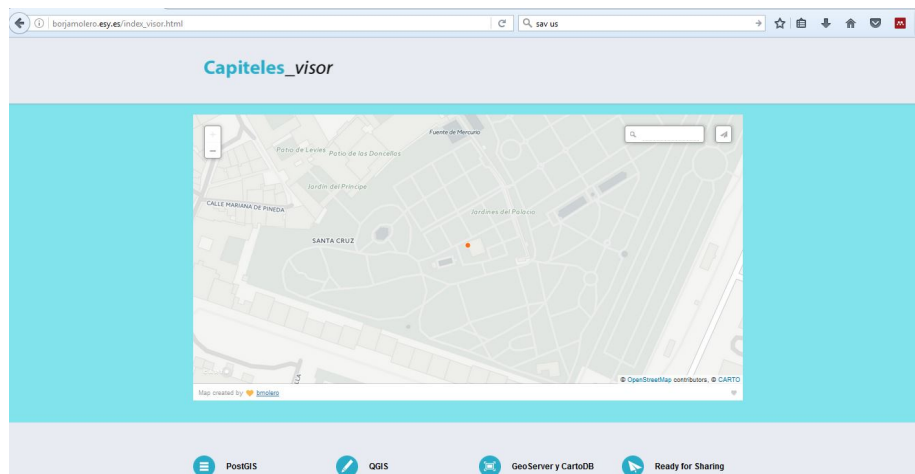


Figura 8.3: Imagen del visor SIG generado. Fuente: Autor.

8.3. App Realidad Aumentada

Otro de los productos generados tras la generación del modelo tridimensional del capitel ha sido una aplicación para plataformas Andorid. Esta App ha sido realizada en equipo junto con el Secretariado de Recursos Audiovisuales y Nuevas Tecnologías de la Universidad de Sevilla.

Se trata de 2 aplicaciones con el mismo contenido pero con distinto marcador para la activación de dicho marcador:

- “Capitel 1” tiene como marcador una imagen 2D del capitel del cenador de Carlos V, en el Alcázar de Sevilla digitalizado.
- “Capitel 2” tiene como marcador el capitel real ubicado en el Alcázar.

La diferencias entre dichos marcadores viene derivada de las distintas necesidades que intentamos cubrir: un marcador 2D es fácilmente incrustable en documentos de estudio (libros, apuntes de clase, guías impresas, etc...) mientras que el marcador 3D permitirá acceder a la información de dicho capitel en el lugar donde se encuentra sin más medios que nuestro smartphone o tablet con cámara.

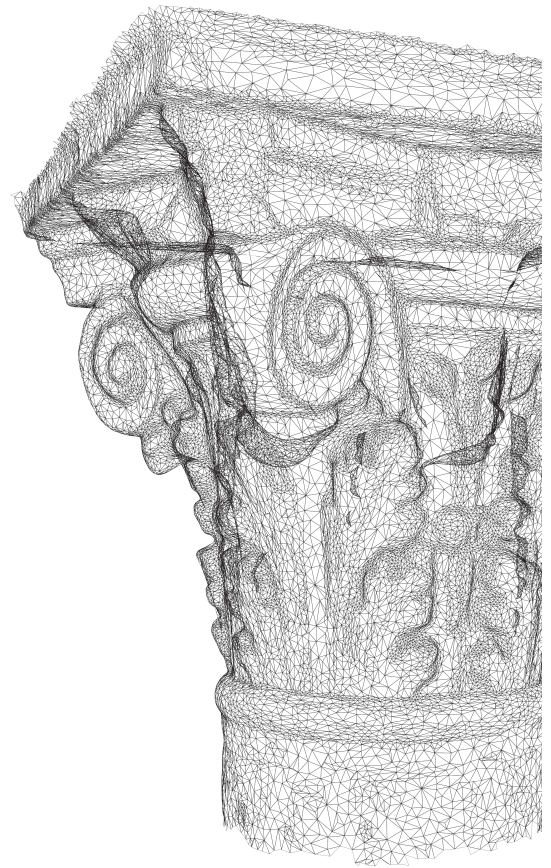
Al enfocar el marcador (el capitel real ubicado en el Alcázar o el marcador 2D), la App nos presenta un recorrido multimedia sobre distintos aspectos del proceso de construcción del modelado 3D de esta estructura, ofreciendo al usuario un menú que ofrece datos sobre su geometría, nube de puntos, TIN y ortoimágenes. También posibilita la visión, ampliado y traslación del modelo 3D.

Permite estudiar los aspectos dimensionales/geométricos característicos y, a la vez , tener la ventaja de visionar el recurso y manipularlo. Todo ello con nuestro móvil y/o tablet, de una manera ágil, sin tener que recurrir a descargas de contenido adicional.

A continuación, los enlaces a sendas App:

- <https://play.google.com/store/apps/details?id=us.sav.ra.Capitel1>
- <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.sav.capitel2>

Conclusiones



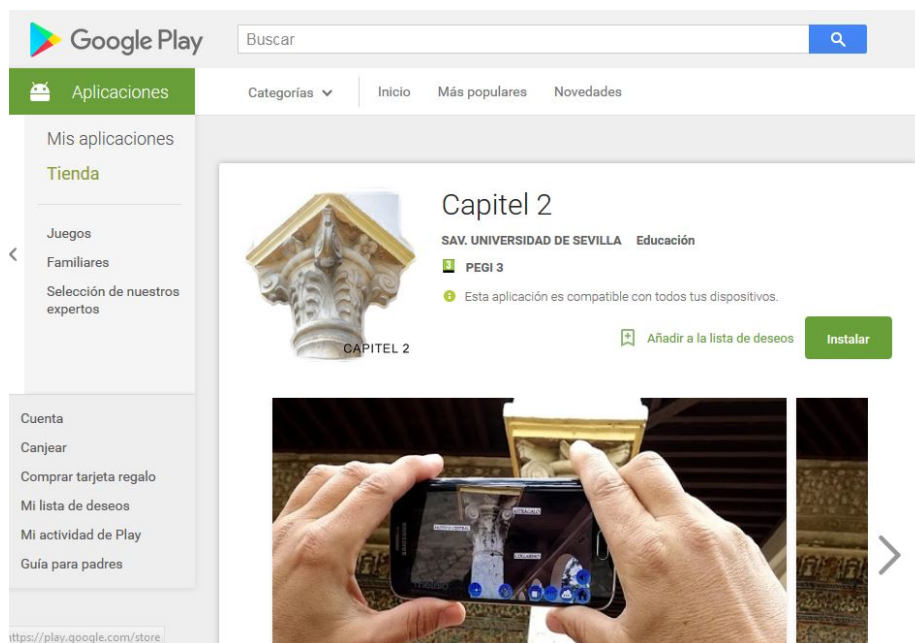


Figura 8.4: App de Realidad Aumentada del capitel digitalizado en la plataforma Play Store. Fuente: Autor.

Capítulo 9

Conclusiones finales de la investigación

9.1. Objetivos

Comenzaremos el análisis de las conclusiones de nuestra investigación con la recuperación de los objetivos, uno a uno, con la descripción de su cumplimiento y la referencia a los resultados obtenidos. Recordamos que fueron enumerados en el Capítulo 2 “Objetivos”. Cuando sea posible, justificaremos dicho cumplimiento con referencias a los desarrollos expuestos en el presente documento. En caso contrario, es decir, cuando no pueda justificarse su cumplimiento, resaltaremos el objetivo como no cumplido y evaluaremos la/s causa/s.

En primer lugar, analizaremos los objetivos específicos o secundarios:

- **Objetivo Secundario nº1:** *Analizar las posibles técnicas existentes a emplear en la digitalización tridimensional. Prestando especial atención a factores como respeto a los elementos y los recursos materiales necesarios.*

Concluimos este objetivo como cumplido habiendo sido elaborado a lo largo del Capítulo 5 “Estudios previos”, Apartado 5.1, denominado “Líneas seguidas”. Como resultado se han analizado un total de tres técnicas: escaneado láser, escaneado óptico y fotogrametría. Ha existido una gran influencia de los recursos disponibles a nuestro alcance y en todo momento se ha conservado la premisa de no someter al elemento digitalizado a manipulaciones o contacto directo.

- **Objetivo Secundario nº2:** *Evaluar la adecuación de las técnicas a un caso de estudio concreto mediante la realización de una sencilla puesta en práctica del análisis inmediatamente anterior.*

Concluimos este objetivo como cumplido habiendo sido elaborado a lo largo del Capítulo 5 “Estudios previos”, Apartado 5.1, denominado “Primeros levantamientos”. Como resultado podemos hacer referencia al levantamiento individualizado de uno de los capiteles del Cenador de Carlos V mediante el empleo de dos técnicas (fotogrametría y escaneado).

- **Objetivo Secundario nº3:** *Aplicar las primeras conclusiones para la elaboración de un proyecto complejo.*

Concluimos este objetivo como cumplido habiendo sido elaborado a lo largo del Capítulo 6, denominado “Levantamiento de los capiteles del Patio de las Muñecas”. Se ha realizado el levantamiento completo de cada capitel por individualizado mediante fotogrametría y apoyo de estación total. Además, todos los modelos tridimensionales han sido localizados en un mismo sistema de referencia local.

- **Objetivo Secundario nº4:** *Simular un proyecto de difusión ayudado por nuevas tecnologías como los SIG y la Realidad Aumentada, que pueda servir para la difusión del patrimonio y para la gestión de la información por parte de investigadores y profesionales del patrimonio.*

Concluimos este objetivo como cumplido habiendo sido elaborado a lo largo del Capítulo 7, denominado “Desarrollo de Sistema de Información Geográfica”. Hemos desarrollado paso a paso la idea de implementación en SIG de los trabajos de digitalización 3D. Se ha iniciado el proyecto de difusión.

- **Objetivo Secundario nº5:** *Proporcionar visibilidad web a los resultados de la investigación e idea de difusión mediante nuevas tecnologías.*

Concluimos este objetivo como cumplido habiendo sido elaborado a lo largo del Capítulo 8, denominado “Publicación online de resultados”. Como resultado se proporcionan varios enlaces web que dan acceso directo a modelos tridimensionales y plataforma SIG. La visualización puede realizarse desde cualquier navegador web, ya sea en PC o dispositivo móvil.

A continuación, analizaremos los objetivos principales:

- **Objetivo Principal nº1:** *Elaborar un protocolo de levantamiento tridimensional de capiteles con el fin de ayudar a la estandarización de los procesos de digitalización, gestión y difusión.*

Concluimos este objetivo como cumplido habiendo sido elaborado a lo largo del Capítulo 5 “Estudios previos”, concretándose en el Apartado 5.2.2, denominado “Propuestas de protocolos”. Podemos afirmar que han sido descritos paso

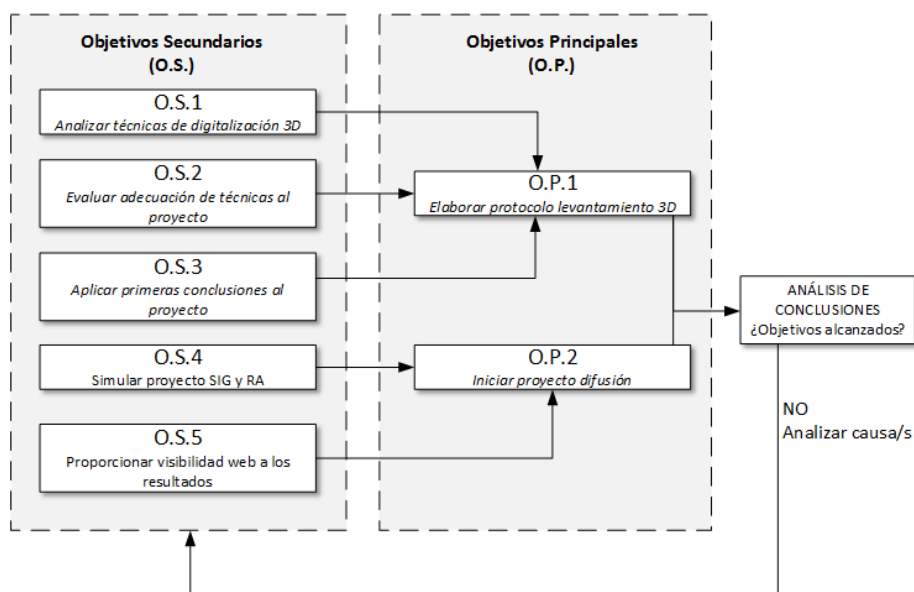


Figura 9.1: Diagrama de alimentación de objetivos. Fuente: Autor.

a paso las acciones realizadas para la digitalización tridimensional, aportandose todos los análisis para justificar las decisiones tomadas.

- **Objetivo Principal nº2:** *Iniciar la elaboración de un proyecto de difusión de los modelos tridimensionales digitales, con el fin de aportar un valor añadido a la información generada en desarrollos anteriores de la investigación: valor analítico-geográfico y ayuda a difusión digital.*

Concluimos este objetivo como cumplido habiendo sido elaborado a lo largo de los capítulos: Capítulo 7, denominado “Desarrollo de Sistema de Información Geográfica”, y Capítulo 8, denominado “Publicación online de resultados”. Justificamos que el objetivo ha sido cumplido porque hemos descrito paso a paso las acciones realizadas para el desarrollo del SIG y cómo hacer públicos los resultados de forma digital con la ayuda de enlaces web. Aunque la plataforma SIG no queda completa, sino que solo muestra un capitel, el objetivo de “iniciar” el desarrollo de nuestra idea queda satisfecho.

En el diagrama 9.1 se expone la alimentación entre objetivos mostrando como la consecución de cada una de las tareas marcadas como objetivos secundarios nos ayudan a la consecución de nuestros objetivos principales.

9.2. Preguntas de la investigación

Estas líneas están relacionadas con la resolución de las cuestiones planteadas en el Apartado 1.2, denominado “Crisis de paradigmas”:

- ***Pregunta de investigación n°1: Sobre las posibilidades en la toma de datos.***

Aunque el método fotogramétrico puede ser realizado con unos recursos más asequibles o económicos, el método de escaneado de triangulación óptico nos permite obtener nubes de puntos en tiempo real con un mayor control sobre los procesos de trabajo desde la fase de toma de datos. El manejo del software en ambos métodos es bastante automatizado (más en el método fotogramétrico/SFM). En cualquier caso, ha sido determinante el control exhaustivo de todos los parámetros del proceso para fase de toma de datos, incluyendo la toma de puntos de control. Podemos destacar que en ambos protocolos la fase de planificación y toma de datos en campo se muestra como primordial, pues de ella depende, no solo las calidades métricas y visuales del modelo final, sino también los tiempos de trabajo en post-proceso.

- ***Pregunta de investigación n°2: Sobre los métodos de trabajo.***

Adaptando los métodos de trabajo a nuestra investigación, podemos afirmar que tienen más potencial aquellos métodos que permiten el trabajo con equipos portátiles, alimentados a batería, y que permitan gran libertad de movimiento en torno al objeto a levantar. Nos referimos a equipos como las cámaras fotográficas, escáneres de mano (a batería¹) o la estación total.

- ***Pregunta de investigación n°3: Sobre los recursos temporales.***

No ha sido desarrollado un estudio de tiempos. Creemos que para la realización de dicho estudio de forma rigurosa se requiere de una experiencia amplia sobre ambos métodos, donde una posible curva de aprendizaje no influyese sobre los datos finales.

A modo orientativo, y con vistas a corroborarlo en investigaciones futuras, resaltamos en estas líneas que el levantamiento realizado mediante tecnología escáner de triangulación óptico requiere mayores recursos en horas de trabajo de técnico. A priori, parece que esta hipótesis encaja con aspectos ya mencionados anteriormente: un mayor control sobre todo el proceso de levantamiento tridimensional puede derivar en una mayor carga de trabajo para el técnico encargado del mismo. Lo anotamos como línea futura a investigar.

- ***Pregunta de investigación n°4: Sobre la objetividad de los resultados.***

¹En nuestra investigación hemos empleado un escáner de mano con alimentación eléctrica.

La mejor geometría de captura para nuestra investigación es una adquisición circular completa alrededor del capitel a diversas alturas. Esto ayuda a la reducción automática de errores en la fase de orientación de imágenes. El uso de dianas (naturales o artificiales) es esencial. Nos hemos decantado por puntos naturales del elemento en los estudios previos y por dianas artificiales (apoyándonos en el puntero láser de la estación total) en el levantamiento de los capiteles del Patio de las Muñecas. Deben de estar uniformemente distribuidos, ser visibles desde el mayor número de imágenes posible y ayudar a la construcción de la geometría en aquellos lugares donde es más compleja y los procesos de reconstrucción por píxeles puedan fallar. Una uniforme disposición de las dianas puede ayudarnos actuando como restricciones externas en la fase de orientación de cámaras.

■ ***Pregunta de investigación nº5: Sobre las posibilidades de difusión.***

El propósito de esta pregunta era provocar el estudio de cómo acercar los productos generados a cualquiera que deseara consultarlos. Se ha creado el visor online de modelos 3D y la APP de Realidad Aumentada. Cualquier persona podrá visualizar los modelos 3D mediante el PC o dispositivo móvil.

■ ***Pregunta de investigación nº6: Sobre cómo aportar valor añadido a nuestros modelos a través el ámbito geográfico.***

Hemos realizado un ejemplo paso a paso que nos ha permitido cumplir nuestros objetivos. Ha sido relacionado el producto de digitalización 3D con una plataforma que permite geolocalizarlo y añadir información adicional. Pero a nuestro juicio esto no es suficiente: debemos buscar una mejor integración entre información geométrica, información puramente documental e información geográfica y topológica. Establecemos como futura línea de investigación seguir con el estudio de este punto, que entendemos es de gran importancia y tiene una gran potencialidad de futuro.

9.3. Conclusiones generales de síntesis

Añadiremos unas conclusiones generales de síntesis, separadas y numeradas, destacando aportaciones de la investigación que estimamos de importancia:

1. Geometría, dimensiones y metricidad como pilares básicos para la documentación llevada a cabo en la presente investigación.

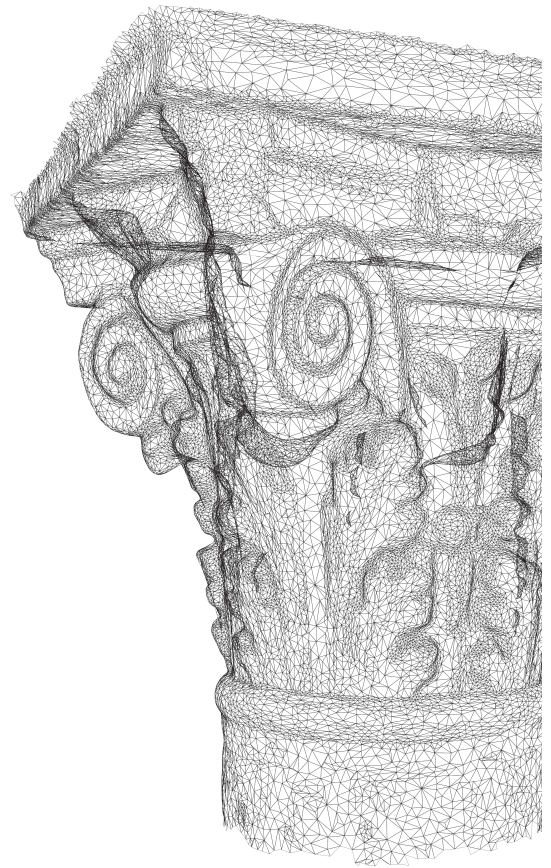
2. Debemos dejar atrás definitivamente el uso de este tipo de tecnologías con labor puramente documentalista para apostar en el uso como herramientas de apoyo a técnicos (arqueólogos, arquitectos, restauradores,...) con aporte de información precisa y objetiva que les ayuden en sus intervenciones/investigaciones.
3. Parámetros como el propio elemento a levantar, su entorno, las finalidades del trabajo, los requisitos del proyecto y resultados deseados hacen que cada proyecto sea diferente, debiendo adaptar las técnicas y métodos más idóneos a cada uno de ellos.
4. Cada técnica de digitalización tiene unos rasgos característicos que derivan en diversos procesos de intervención, tiempos de ejecución, presupuestos y precisiones, y debemos evaluar todas estas variables para lograr la adecuación de la técnica a cada trabajo concreto. Es requerida experiencia para una correcta elección de la técnica a emplear en cada proyecto. La bibliografía científica muestra una tendencia hacia la implementación de distintas técnicas en un mismo proyecto.
5. Los avances en informática permiten que las tareas de procesado intenso se automaticen disminuyendo en muchos casos el control sobre el proyecto, llegando incluso a realizarse dichas tareas en servidores online.

9.4. Futuras líneas de investigación

Con el objetivo de seguir con el desarrollo de las ideas aquí presentadas resaltamos las siguientes líneas de cara a futuras investigaciones:

- Colaborar con investigadores del campo de la arqueología para poner en crisis el modelo planteado y buscar nuevas alternativas que ofrezcan un valor añadido a los datos geométricos, geográficos y topológicos que pueden manejar estos investigadores y que los profesionales de los levantamientos podemos adecuarlos a sus necesidades.
- Seguir avanzando en la mejora de la interacción de la plataforma SIG con el producto de digitalización tridimensional.
- Adquirir la experiencia suficiente en el manejo de técnicas de digitalización con el fin de elaborar un estudio de recursos temporales objetivo y fiable.

Anexos



Capítulo 10

Anexos

10.1. Desarrollo SIG

10.1.1. Definición de nivel lógico de la base de datos

PROPIETARIOS (pro_id, pro_publico, pro_cifnif, pro_nombreapellidos,
pro_telefono, pro_email)
PK (pro_id)
UQ (pro_cifnif)

MATERIALES (mat_id, mat_nombre)
PK (mat_id)
UQ (pro_cifnif)

ORDENES (ord_id, ord_tipo, ord_subtipo)
PK (ord_id)
UQ (ord_tipo, ord_subtipo)

TECNICAS (tec_id, tec_nombre)
PK (tec_id)
UQ (tec_nombre)

TIPOS_FICHEROS (tpf_id, tpf_3D, tpf_extension)
PK (tpf_id)
UQ (tpf_3d, tpf_extension)

TIPOS_BIBLIOGRAFIAS (tpb_id, tpb_tipologia)
PK (tpb_id)
UQ (tpb_tipologia)

AUTORES (aut_id, aut_nombre, aut_apellidos)
PK (aut_id)
UQ (aut_nombre, aut_apellidos)

TALLERES (tal_id, tal_nombre)
 PK (tal_id)
 UQ (tal_nombre)

BIBLIOGRAFIAS (bib_id, bib_titulo, bib_anno, bib_isbn, tpb_id)
 PK (bib_id)
 FK1 (tpb_id) / TIPOS_BIBLIOGRAFIAS
 UQ (bib_isbn)

BIBLIOGRAFIAS_AUTORES (bib_id, aut_id)
 PK (bib_id, aut_id)
 FK1 (bib_id) / BIBLIOGRAFIAS
 FK2 (aut_id) / AUTORES

CAPITALES (cap_id, cap_datacion, cap_descripcion, cap_fotografia, cap_x,
 cap_y, cap_z, pro_id, mat_id, ord_id, tec_id, tal_id)
 PK (cap_id)
 FK1 (pro_id) / PROPIETARIO
 FK2 (mat_id) / MATERIAL
 FK3 (ord_id) / ORDEN
 FK4 (tec_id) / TECNICA
 FK5 (tal_id) / TALLER

CAPITALES_BIBLIOGRAFIAS (cap_id, bib_id)
 PK (cap_id, bib_id)
 FK1 (cap_id)
 FK2 (bib_id)

INSPECCIONES (ins_id, ins_fecha, ins_descripcion, ins_necesidadint, cap_id)
 PK (ins_id)
 FK (cap_id) / CAPITALES
 UQ (ins_fecha, cap_id)

INTERVENCIONES (int_id, int_fecha, int_motivo, int_descripcion, cap_id)
 PK (int_id)
 FK (cap_id) / CAPITALES
 UQ (int_fecha, cap_id)

FICHEROS (fic_id, fic_fecha, fic_nombre, fic_descripcion, fic_binario, fic_url,
 tpf_id, cap_id)
 PK (fic_id)
 FK1 (tpf_id) / TIPOS_FICHEROS
 FK2(cap_id) / CAPITALES

10.1.2. Definición de esquema físico de la base de datos

TABLA 1: PROPIETARIOS

pro_id serial NOT NULL - pk_propietario PRIMARY KEY
pro_publico boolean NOT NULL
pro_cifnif character varying(15) NOT NULL, UNIQUE
pro_nombreapellidos character varying(300) NOT NULL
pro_telefono character varying(20) NOT NULL
pro_email character varying(100)

TABLA 2: MATERIALES

mat_id serial NOT NULL - pk_material PRIMARY KEY
mat_nombre character varying(20) NOT NULL, UNIQUE

TABLA 3: ORDENES

ord_id serial NOT NULL - pk_orden PRIMARY KEY
ord_tipo character varying(20) NOT NULL, UNIQUE
ord_subtipo character varying(20) UNIQUE

TABLA 4: TECNICAS

tec_id serial NOT NULL - pk_tecnica PRIMARY KEY
tec_nombre character varying(20) NOT NULL, UNIQUE

TABLA 5: TIPOS_FICHEROS

tpf_id serial NOT NULL - pk_tipo_fichero PRIMARY KEY
tpf_3D boolean NOT NULL, UNIQUE
tpf_extension character varying(5) NOT NULL, UNIQUE

TABLA 6: TIPOS_BIBLIOGRAFIAS

tpb_id serial NOT NULL - pk_tipo_bibliografia PRIMARY KEY
tpb_tipologia character varying(20) NOT NULL, UNIQUE

TABLA 7: AUTORES

aut_id serial NOT NULL - pk_autor PRIMARY KEY
aut_nombre character varying(15) NOT NULL, UNIQUE
aut_apellidos character varying(30) NOT NULL, UNIQUE

TABLA 8: TALLERES

tal_id serial NOT NULL - pk_taller PRIMARY KEY
tal_nombre character varying(20) NOT NULL, UNIQUE

TABLA 9: BIBLIOGRAFIAS

bib_id serial NOT NULL - pk_bibliografia PRIMARY KEY
bib_titulo character varying(300) NOT NULL
bib_anno character varying(4) NOT NULL
bib_isbn character varying(20) NOT NULL, UNIQUE
tpb_id integer NOT NULL - fk_bibliografias FOREIGN KEY /tipos_bibliografias

TABLA 10: BIBLIOGRAFIAS_AUTORES

bib_id integer NOT NULL - PRIMARY KEY /FOREIGN KEY /bibliografias

aut_id integer NOT NULL – PRIMARY KEY /FOREIGN KEY /autores

TABLA 11: CAPITELES

cap_id serial NOT NULL – pk_capitel PRIMARY KEY
cap_datacion character varying(9)
cap_descripcion character varying(600) NOT NULL
cap_fotografia bytea
cap_x double precision
cap_y double precision
cap_z double precision
pro_id integer NOT NULL - fk1_capiteles FOREIGN KEY /propietarios
mat_id integer NOT NULL – fk2_capiteles FOREIGN KEY /materiales
ord_id integer NOT NULL – fk3_capiteles FOREIGN KEY /ordenes
tec_id integer NOT NULL – fk4_capiteles FOREIGN KEY /tecnicas
tal_id integer NOT NULL – fk5_capiteles FOREIGN KEY /talleres

TABLA 12: CAPITELES_BIBLIOGRAFIAS

cap_id integer NOT NULL – PRIMARY KEY /FOREIGN KEY /capiteles
bib_id integer NOT NULL – PRIMARY KEY /FOREIGN KEY /bibliografias

TABLA 13: INSPECCIONES

ins_id serial NOT NULL – pk_inspeccion PRIMARY KEY
ins_fecha date - AAAA-MM-DD ISO 8601 - NOT NULL, UNIQUE
ins_descripcion character varying(600) NOT NULL
ins_necesidadint boolean NOT NULL
cap_id integer NOT NULL, UNIQUE – fk1_inspecciones /FOREIGN KEY /capiteles

TABLA 14: INTERVENCIONES

int_id serial NOT NULL - pk_intervenciones PRIMARY KEY
int_fecha date - AAAA-MM-DD ISO 8601 - NOT NULL, UNIQUE
int_motivo character varying(600) NOT NULL
int_descripcion character varying(600) NOT NULL
cap_id integer NOT NULL, UNIQUE – fk1_inspecciones /FOREIGN KEY /capiteles

TABLA 15: FICHEROS

fic_id serial NOT NULL - pk_ficheros PRIMARY KEY
fic_fecha date - AAAA-MM-DD ISO 8601 - NOT NULL
fic_nombre character varying(20) NOT NULL
fic_descripcion character varying(600) NOT NULL
fic_binario bytea
fic_url character varying(256)
tpf_id integer NOT NULL – fk1_ficheros /FOREIGN KEY /tipos_ficheros
cap_id integer NOT NULL – fk2_ficheros /FOREIGN KEY /capiteles

10.1.3. Programación SQL de la Base de Datos

```
CREATEDB capiteles
CREATE EXTENSION postgis;
SELECT postgis_full_version();
CREATE TABLE propietarios
(
    pro_id serial NOT NULL,
    pro_publico boolean not null,
    pro_cifnif character varying(15),
    pro_nombreapellidos character varying(300) not null,
    pro_telefono character varying(20),
    pro_email character varying(100),
    CONSTRAINT pk_propietario PRIMARY KEY (pro_id),
    CONSTRAINT uq_propietarios UNIQUE (pro_cifnif)
)
WITH (
    OIDS=FALSE
);
ALTER TABLE propietarios
    OWNER TO postgres;
COMMENT ON COLUMN propietarios.pro_publico IS 'Sera
verdadero cuando el propietario sea de caracter publico (
entidad publica).';
COMMENT ON COLUMN propietarios.pro_cifnif IS 'Se introducira
la informacion sin espacios ni guiones.';
COMMENT ON COLUMN propietarios.pro_nombreapellidos IS '
NOMBRE APELLIDO1 APELLIDO2 (Sin comas)';
COMMENT ON COLUMN propietarios.pro_telefono IS '+34
666666666 (Sin guiones ni puntos)';
COMMENT ON COLUMN propietarios.pro_email IS 'email@email.com
';

CREATE TABLE materiales
(
    mat_id serial NOT NULL,
    mat_nombre character varying(20) not null,
    CONSTRAINT pk_material PRIMARY KEY (mat_id),
    CONSTRAINT uq_materiales UNIQUE (mat_nombre)
)
WITH (
    OIDS=FALSE
);
ALTER TABLE materiales
    OWNER TO postgres;
COMMENT ON COLUMN materiales.mat_nombre IS 'Se definira el
nombre del material.';

CREATE TABLE ordenes
(
    ord_id serial NOT NULL,
    ord_tipo character varying(20) not null,
```

```

    ord_subtipo character varying(20),
    CONSTRAINT pk_orden PRIMARY KEY (ord_ID),
    CONSTRAINT uq_ordenes UNIQUE (ord_tipo,ord_subtipo)
)
WITH (
    OIDS=FALSE
);
ALTER TABLE ordenes
    OWNER TO postgres;
COMMENT ON COLUMN ordenes.ord_tipo IS 'Se definira el orden
    del material (Ej.: Corintio).';
COMMENT ON COLUMN ordenes.ord_subtipo IS 'Se definira el
    subtipo en el caso que sea Corintio (Ej.: Hojas Lisas).';

CREATE TABLE tecnicas
(
    tec_id serial NOT NULL,
    tec_nombre character varying(20) not null,
    CONSTRAINT pk_tecnica PRIMARY KEY (tec_id),
    CONSTRAINT uq_tecnicas UNIQUE (tec_nombre)
)
WITH (
    OIDS=FALSE
);
ALTER TABLE tecnicas
    OWNER TO postgres;
COMMENT ON COLUMN tecnicas.tec_nombre IS 'Se definira la
    tecnica de labrado (Ej.: Esculpido).';

CREATE TABLE tipos_ficheros
(
    tpf_id serial NOT NULL,
    tpf_3d boolean not null,
    tpf_extension character varying(5) not null,
    CONSTRAINT pk_tipo_fichero PRIMARY KEY (tpf_id),
    CONSTRAINT uq_tipos_ficheros UNIQUE (tpf_3d,tpf_extension)
)
WITH (
    OIDS=FALSE
);
ALTER TABLE tipos_ficheros
    OWNER TO postgres;
COMMENT ON COLUMN tipos_ficheros.tpf_3d IS 'Sera verdadero
    en caso de ser informacion tridimensional.';
COMMENT ON COLUMN tipos_ficheros.tpf_extension IS 'Se
    definira la extension del archivo, sin punto (ej.: obj).';
;

CREATE TABLE tipos_bibliografias
(
    tpb_id serial NOT NULL,
    tpb_tipologia character varying(20) NOT NULL,

```



```

        CONSTRAINT pk_tipo_bibliografia PRIMARY KEY (tpb_id),
        CONSTRAINT uq_tipos_bibliografias UNIQUE (tpb_tipologia)
    )
    WITH (
        OIDS=FALSE
    );
    ALTER TABLE tipos_bibliografias
        OWNER TO postgres;
    COMMENT ON COLUMN tipos_bibliografias.tpb_tipologia IS 'Se
        definira la tipologia de la publicacion (ej.: tesis).';

    CREATE TABLE autores
    (
        aut_id serial NOT NULL,
        aut_nombre character varying(15) not null,
        aut_apellidos character varying(30) not null,
        CONSTRAINT pk_autor PRIMARY KEY (aut_id),
        CONSTRAINT uq_autores UNIQUE (aut_nombre,aut_apellidos)
    )
    WITH (
        OIDS=FALSE
    );
    ALTER TABLE autores
        OWNER TO postgres;

    CREATE TABLE talleres
    (
        tal_id serial NOT NULL,
        tal_nombre character varying(20) not null,
        CONSTRAINT pk_taller PRIMARY KEY (tal_id),
        CONSTRAINT uq_talleres UNIQUE (tal_nombre)
    )
    WITH (
        OIDS=FALSE
    );
    ALTER TABLE talleres
        OWNER TO postgres;

    CREATE TABLE bibliografias
    (
        bib_id serial NOT NULL,
        bib_titulo character varying(300) not null,
        bib_anno character varying(4) not null,
        bib_isbn character varying(20) not null,
        tpb_id integer not null,

        CONSTRAINT pk_bibliografia PRIMARY KEY (bib_id),
        CONSTRAINT fk1_bibliografia FOREIGN KEY (tpb_id)
            REFERENCES tipos_bibliografias (tpb_id) MATCH SIMPLE
            ON UPDATE NO ACTION ON DELETE NO ACTION,
        CONSTRAINT uq_bibliografias UNIQUE (bib_isbn)
    )

```

```

WITH (
    OIDS=FALSE
);
ALTER TABLE bibliografias
    OWNER TO postgres;
COMMENT ON COLUMN bibliografias.bib_anno IS 'Anno de
    publicacion del ejemplar.';
COMMENT ON COLUMN bibliografias.bib_isbn IS 'ISBN de la
    publicacion (sin espacios ni guiones).';

CREATE TABLE bibliografias_autores
(
    bib_id integer    not null,
    aut_id integer    not null,
    CONSTRAINT pk_bibliografia_autor PRIMARY KEY (bib_id,
        aut_id),
    CONSTRAINT fk1_bibliografia_autor FOREIGN KEY (bib_id)
        REFERENCES bibliografias (bib_id) MATCH SIMPLE
        ON UPDATE NO ACTION ON DELETE NO ACTION,
    CONSTRAINT fk2_bibliografia_autor FOREIGN KEY (aut_id)
        REFERENCES autores (aut_id) MATCH SIMPLE
        ON UPDATE NO ACTION ON DELETE NO ACTION
)
WITH (
    OIDS=FALSE
);
ALTER TABLE bibliografias_autores
    OWNER TO postgres;
COMMENT ON TABLE bibliografias_autores
    IS 'Tabla relacion n-n';

CREATE TABLE capiteles
(
    cap_id serial NOT NULL,
    cap_datacion character varying(9),
    cap_descripcion character varying(600)    not null,
    cap_fotografia bytea,
    cap_x double precision,
    cap_y double precision,
    cap_z double precision,
    pro_id integer    not null,
    mat_id integer    not null,
    ord_id integer    not null,
    tec_id integer    not null,
    tal_id integer    not null,
    CONSTRAINT pk_capitel PRIMARY KEY (cap_id),
    CONSTRAINT fk1_capitel FOREIGN KEY (pro_id)
        REFERENCES propietarios (pro_id) MATCH SIMPLE
        ON UPDATE NO ACTION ON DELETE NO ACTION,
    CONSTRAINT fk2_capitel FOREIGN KEY (mat_id)
        REFERENCES materiales (mat_id) MATCH SIMPLE
        ON UPDATE NO ACTION ON DELETE NO ACTION,

```

```

        CONSTRAINT fk3_capitel FOREIGN KEY (ord_id)
            REFERENCES ordenes (ord_id) MATCH SIMPLE
            ON UPDATE NO ACTION ON DELETE NO ACTION,
        CONSTRAINT fk4_capitel FOREIGN KEY (tec_id)
            REFERENCES tecnicas (tec_id) MATCH SIMPLE
            ON UPDATE NO ACTION ON DELETE NO ACTION,
        CONSTRAINT fk5_capitel FOREIGN KEY (tal_id)
            REFERENCES talleres (tal_id) MATCH SIMPLE
            ON UPDATE NO ACTION ON DELETE NO ACTION
    )
    WITH (
        OIDS=FALSE
    );
    ALTER TABLE capiteles
        OWNER TO postgres;
    COMMENT ON TABLE capiteles
        IS 'Esta tabla contendra todas las propiedades del capitel
        , incluida su localizacion.';
    COMMENT ON COLUMN capiteles.cap_datacion IS 'Se introducira
        la informacion en el siguiente formato: AAAA-AAAA (ej.:
        0900-1500).';
    COMMENT ON COLUMN capiteles.cap_descripcion IS 'Breve
        descripcion del elemento, entorno,... y otra informacion
        relevante.';
    COMMENT ON COLUMN capiteles.cap_fotografia IS 'Fotografia
        identificativa del capitel.';
    COMMENT ON COLUMN capiteles.cap_x IS 'Localizacion en X (o
        longitud en el caso de coordenadas geograficas).
    ';
    COMMENT ON COLUMN capiteles.cap_y IS 'Localizacion en Y (o
        latitud en el caso de coordenadas geograficas).';
    COMMENT ON COLUMN capiteles.cap_z IS 'Localizacion en Z.';

    CREATE TABLE capiteles_bibliografias
    (
        cap_id integer not null,
        bib_id integer not null,
        CONSTRAINT pk_capitel_bibliografia PRIMARY KEY (cap_id,
            bib_id),
        CONSTRAINT fk1_capitel_bibliografia FOREIGN KEY (cap_id)
            REFERENCES capiteles (cap_id) MATCH SIMPLE
            ON UPDATE NO ACTION ON DELETE NO ACTION,
        CONSTRAINT fk2_capitel_bibliografia FOREIGN KEY (bib_id)
            REFERENCES bibliografias (bib_id) MATCH SIMPLE
            ON UPDATE NO ACTION ON DELETE NO ACTION
    )
    WITH (
        OIDS=FALSE
    );
    ALTER TABLE capiteles_bibliografias
        OWNER TO postgres;
    COMMENT ON TABLE capiteles_bibliografias

```

```

IS 'Tabla relacion n-n.';

CREATE TABLE inspecciones
(
    ins_id serial NOT NULL,
    ins_fecha date not null,
    ins_descripcion character varying(600) NOT NULL,
    ins_necesidadint boolean not null,
    cap_id integer not null,
    CONSTRAINT pk_inspeccion PRIMARY KEY (ins_id),
    CONSTRAINT fk1_inspecciones FOREIGN KEY (cap_id)
        REFERENCES capiteles (cap_id) MATCH SIMPLE
        ON UPDATE NO ACTION ON DELETE NO ACTION,
    CONSTRAINT uq_inspecciones UNIQUE (ins_fecha,cap_id)
)
WITH (
    OIDS=FALSE
);
ALTER TABLE inspecciones
    OWNER TO postgres;
COMMENT ON COLUMN inspecciones.ins_fecha IS 'Para introducir
    la informacion usaremos el formato recomendado por ISO
    8601 (ej.: 2014-12-30).';
COMMENT ON COLUMN inspecciones.ins_descripcion IS 'Se
    describira brevemente la inspeccion.';
COMMENT ON COLUMN inspecciones.ins_necesidadint IS 'Sera
    verdadero en caso de necesitar intervencion como
    resultado de la inspeccion.';

CREATE TABLE intervenciones
(
    int_id serial NOT NULL,
    int_fecha date not null,
    int_motivo character varying(600) not null,
    int_descripcion character varying(600) not null,
    cap_id integer not null,
    CONSTRAINT pk_intervencion PRIMARY KEY (int_id),
    CONSTRAINT fk1_intervenciones FOREIGN KEY (cap_id)
        REFERENCES capiteles (cap_id) MATCH SIMPLE
        ON UPDATE NO ACTION ON DELETE NO ACTION,
    CONSTRAINT uq_intervenciones UNIQUE (int_fecha,cap_id)
)
WITH (
    OIDS=FALSE
);
ALTER TABLE intervenciones
    OWNER TO postgres;
COMMENT ON COLUMN intervenciones.int_fecha IS 'Para
    introducir la informacion usaremos el formato recomendado
    por ISO 8601 (ej.: 2014-12-30).';
COMMENT ON COLUMN intervenciones.int_motivo IS 'Breve
    descripcion de los motivos enlazando con las inspecciones

```

```

        en caso de necesidad.';
COMMENT ON COLUMN intervenciones.int_descripcion IS '
    Descripcion de los trabajos.';

CREATE TABLE ficheros
(
    fic_id serial NOT NULL,
    fic_fecha date NOT NULL,
    fic_nombre character varying(20) not null,
    fic_descripcion character varying(600) not null,
    fic_binario bytea,
    fic_url character varying(256),
    tpf_id integer not null,
    cap_id integer not null,
    CONSTRAINT pk_ficheros PRIMARY KEY (fic_id),
    CONSTRAINT fk1_ficheros FOREIGN KEY (tpf_id)
        REFERENCES tipos_ficheros (tpf_id) MATCH SIMPLE
        ON UPDATE NO ACTION ON DELETE NO ACTION,
    CONSTRAINT fk2_ficheros FOREIGN KEY (cap_id)
        REFERENCES capiteles (cap_id) MATCH SIMPLE
        ON UPDATE NO ACTION ON DELETE NO ACTION
)
WITH (
    OIDS=FALSE
);
ALTER TABLE ficheros
    OWNER TO postgres;
COMMENT ON COLUMN ficheros.fic_fecha IS 'Fecha de subida o
    actualizacion.';
COMMENT ON COLUMN ficheros.fic_nombre IS 'Nombre descriptivo
    del fichero';
COMMENT ON COLUMN ficheros.fic_descripcion IS 'Breve
    descripcion del fichero.';
COMMENT ON COLUMN ficheros.fic_binario IS 'Archivo binario.'
;
COMMENT ON COLUMN ficheros.fic_url IS 'Repositorio externo.'
;
COMMENT ON COLUMN ficheros.tpf_id IS 'Clave foranea para
    tipos_ficheros';

insert into ordenes (ord_tipo, ord_subtipo) values ('Egipcio
', 'loto cerrado');
insert into ordenes (ord_tipo, ord_subtipo) values ('Egipcio
', 'loto abierto');
insert into ordenes (ord_tipo, ord_subtipo) values ('Toscano
', null);
insert into ordenes (ord_tipo, ord_subtipo) values ('Dorico'
, null);
insert into ordenes (ord_tipo, ord_subtipo) values ('Jonico'
, null);
insert into ordenes (ord_tipo, ord_subtipo) values ('
    Corintio', 'Italico');

```

```

insert into ordenes (ord_tipo, ord_subtipo) values ('
    Corintio', 'Normal');
insert into ordenes (ord_tipo, ord_subtipo) values ('
    Corintio', 'Asiatico');
insert into ordenes (ord_tipo, ord_subtipo) values ('
    Corintio', 'Hojas-Lisas');
insert into ordenes (ord_tipo, ord_subtipo) values ('
    Compuesto', null);
insert into ordenes (ord_tipo, ord_subtipo) values ('
    Romanico', null);
insert into ordenes (ord_tipo, ord_subtipo) values ('Gotico'
    , null);

insert into materiales (mat_nombre) values ('Granito');
insert into materiales (mat_nombre) values ('Basalto');
insert into materiales (mat_nombre) values ('Pomez');
insert into materiales (mat_nombre) values ('Travertino');
insert into materiales (mat_nombre) values ('Caliza');
insert into materiales (mat_nombre) values ('Marmol');

insert into tecnicas (tec_nombre) values ('Trepano');
insert into tecnicas (tec_nombre) values ('Tallado');
insert into tecnicas (tec_nombre) values ('Policromado');
insert into tecnicas (tec_nombre) values ('Biselado');
insert into tecnicas (tec_nombre) values ('Modelado');

insert into tipos_bibliografias (tpb_tipologia) values ('
    Articulo Cientifico');
insert into tipos_bibliografias (tpb_tipologia) values ('
    Articulo Divulgacion');
insert into tipos_bibliografias (tpb_tipologia) values ('
    Revista');
insert into tipos_bibliografias (tpb_tipologia) values ('
    Ensayo');
insert into tipos_bibliografias (tpb_tipologia) values ('
    Resena');
insert into tipos_bibliografias (tpb_tipologia) values ('
    Libro');
insert into tipos_bibliografias (tpb_tipologia) values ('
    Tesis Doctoral');
insert into tipos_bibliografias (tpb_tipologia) values ('
    Tesina');

insert into propietarios (pro_publico, pro_cifnif ,
    pro_nombreapellidos , pro_telefono , pro_email )
values (true, null, 'Museo Arqueolologico de Sevilla.
    Ministerio de Educacion, Cultura y Deporte', '
    +34954786474', 'museoarqueologicosevilla.
    ccul@juntadeandalucia.es');
insert into propietarios (pro_publico, pro_cifnif ,
    pro_nombreapellidos , pro_telefono , pro_email )
values (true, null, 'Real Alcazar de Sevilla', '

```

```

+34954502324', 'actividades@patronato-alcazarsevilla.es')
;
insert into propietarios (pro_publico, pro_cifnif ,
    pro_nombreapellidos , pro_telefono , pro_email )
values (false, '44221510P', 'Pedro Sanchez', '
+34954551456', 'pedrosan@email.es');

insert into tipos_ficheros (tpf_3d, tpf_extension) values (
    false, 'jpg');
insert into tipos_ficheros (tpf_3d, tpf_extension) values (
    false, 'tiff');
insert into tipos_ficheros (tpf_3d, tpf_extension) values (
    false, 'pdf');
insert into tipos_ficheros (tpf_3d, tpf_extension) values (
    true, 'pdf');
insert into tipos_ficheros (tpf_3d, tpf_extension) values (
    true, 'obj');
insert into tipos_ficheros (tpf_3d, tpf_extension) values (
    true, 'ply');
insert into tipos_ficheros (tpf_3d, tpf_extension) values (
    true, 'dxf');
insert into tipos_ficheros (tpf_3d, tpf_extension) values (
    true, '3ds');
insert into tipos_ficheros (tpf_3d, tpf_extension) values (
    true, 'stl');
insert into tipos_ficheros (tpf_3d, tpf_extension) values (
    true, 'xyz');
insert into tipos_ficheros (tpf_3d, tpf_extension) values (
    true, 'txt');
insert into tipos_ficheros (tpf_3d, tpf_extension) values (
    true, 'igs');
insert into tipos_ficheros (tpf_3d, tpf_extension) values (
    true, 'vrl');
insert into tipos_ficheros (tpf_3d, tpf_extension) values (
    true, 'wrp');
insert into tipos_ficheros (tpf_3d, tpf_extension) values (
    true, 'psd');

insert into autores (aut_nombre, aut_apellidos) values ('J.M.'
    , 'Bermudez Cano');

insert into bibliografias (bib_titulo, bib_anno, bib_isbn,
    tpb_id) values ('Las tecnicas de reparacion mediante
    encastres en los talleres adrianeos de Italica. Los
    capiteles',
    2009, 16954076, 1);
insert into bibliografias (bib_titulo, bib_anno, bib_isbn,
    tpb_id) values ('bibliografia 2 de prueba',
    2009, 16954075, 1);

insert into bibliografias_autores (bib_id, aut_id) values
    (1,1);

```

```

insert into talleres(tal_nombre) values ('Zona Italica');

insert into capiteles (cap_datacion, cap_descripcion, pro_id
, mat_id, ord_id, tec_id, tal_id) values ('1000-1100', '
Capitel ubicado en el Real Alcazar de Sevilla, en el
Cenador de la Alcoba. Ha sufrido intervenciones. Seguir
descripcion.', 2,3,4,2,1) ;
insert into capiteles (cap_datacion, cap_descripcion, pro_id
, mat_id, ord_id, tec_id, tal_id) values ('0800-0900', '
Capitel en el Museo Arqueologico de Sevilla. Extraido en
excavacion arqueologica...', 1,2,1,1,1) ;
insert into capiteles (cap_datacion, cap_descripcion, pro_id
, mat_id, ord_id, tec_id, tal_id) values ('1100-1200', '
Capitel ubicado en el patio de las Munecas del Real
Alcazar de Sevilla...', 2,2,2,1,1) ;
insert into capiteles (cap_datacion, cap_descripcion, pro_id
, mat_id, ord_id, tec_id, tal_id) values ('1200-1300', '
Capitel ubicado en...', 3,1,3,2,1) ;
insert into capiteles (cap_datacion, cap_descripcion, pro_id
, mat_id, ord_id, tec_id, tal_id) values ('1300-1400', '
Capitel ubicado en...', 1,2,4,3,1) ;
insert into capiteles (cap_datacion, cap_descripcion, pro_id
, mat_id, ord_id, tec_id, tal_id) values ('1400-1500', '
Capitel ubicado en...', 1,3,5,4,1) ;
insert into capiteles (cap_datacion, cap_descripcion, pro_id
, mat_id, ord_id, tec_id, tal_id) values ('1500-1600', '
Capitel ubicado en...', 2,4,6,5,1) ;
insert into capiteles (cap_datacion, cap_descripcion, pro_id
, mat_id, ord_id, tec_id, tal_id) values ('1600-1700', '
Capitel ubicado en...', 2,5,7,2,1) ;
insert into capiteles (cap_datacion, cap_descripcion, pro_id
, mat_id, ord_id, tec_id, tal_id) values ('1700-1800', '
Capitel ubicado en...', 3,6,8,3,1) ;
insert into capiteles (cap_datacion, cap_descripcion, pro_id
, mat_id, ord_id, tec_id, tal_id) values ('1800-1900', '
Capitel ubicado en...', 3,1,9,4,1) ;
insert into capiteles (cap_datacion, cap_descripcion, pro_id
, mat_id, ord_id, tec_id, tal_id) values ('1500-1600', '
Capitel ubicado en...', 1,2,10,5,1) ;
insert into capiteles (cap_datacion, cap_descripcion, pro_id
, mat_id, ord_id, tec_id, tal_id) values ('0500-0600', '
Capitel ubicado en...', 1,3,11,2,1) ;
insert into capiteles (cap_datacion, cap_descripcion, pro_id
, mat_id, ord_id, tec_id, tal_id) values ('0600-0700', '
Capitel ubicado en...', 2,4,12,3,1) ;
insert into capiteles (cap_datacion, cap_descripcion, pro_id
, mat_id, ord_id, tec_id, tal_id) values ('0700-0800', '
Capitel ubicado en...', 2,5,1,4,1) ;
insert into capiteles (cap_datacion, cap_descripcion, pro_id
, mat_id, ord_id, tec_id, tal_id) values ('0800-0900', '
Capitel ubicado en...', 3,6,2,5,1) ;

```



```

insert into capiteles (cap_datacion, cap_descripcion, pro_id
, mat_id, ord_id, tec_id, tal_id) values ('1500-1600', '
Capitel ubicado en...', 3,1,3,2,1) ;
insert into capiteles (cap_datacion, cap_descripcion, pro_id
, mat_id, ord_id, tec_id, tal_id) values ('1500-1600', '
Capitel ubicado en...', 3,5,6,2,1) ;

insert into ficheros(fic_fecha, fic_nombre, fic_descripcion,
fic_binario, fic_url, tpf_id, cap_id) values ('
2014-01-30', 'Fichero1', 'Modelo 3D realizado con
fotogrametria', null, 'https://sketchfab.com/models/1
lo9mvX2JYxoVrI5QMDKLCi0F8F', 5, 1);
insert into ficheros(fic_fecha, fic_nombre, fic_descripcion,
fic_binario, fic_url, tpf_id, cap_id) values ('
2014-01-30', 'Fichero2', 'Modelo 3D realizado con
fotogrametria', null, 'https://sketchfab.com/models/1
lo9mvX2JYxoVrI5QMDKLCi0F8F', 5, 2);
insert into ficheros(fic_fecha, fic_nombre, fic_descripcion,
fic_binario, fic_url, tpf_id, cap_id) values ('
2014-03-30', 'Fichero3', 'Modelo 3D realizado con
fotogrametria', null, 'https://sketchfab.com/models/1
lo9mvX2JYxoVrI5QMDKLCi0F8F', 5, 3);
insert into ficheros(fic_fecha, fic_nombre, fic_descripcion,
fic_binario, fic_url, tpf_id, cap_id) values ('
2014-04-30', 'Fichero4', 'Modelo 3D realizado con
fotogrametria', null, 'https://sketchfab.com/models/1
lo9mvX2JYxoVrI5QMDKLCi0F8F', 5, 4);
insert into ficheros(fic_fecha, fic_nombre, fic_descripcion,
fic_binario, fic_url, tpf_id, cap_id) values ('
2014-05-30', 'Fichero5', 'Modelo 3D realizado con
fotogrametria', null, 'https://sketchfab.com/models/1
lo9mvX2JYxoVrI5QMDKLCi0F8F', 5, 5);
insert into ficheros(fic_fecha, fic_nombre, fic_descripcion,
fic_binario, fic_url, tpf_id, cap_id) values ('
2014-06-30', 'Fichero6', 'Modelo 3D realizado con
fotogrametria', null, 'https://sketchfab.com/models/1
lo9mvX2JYxoVrI5QMDKLCi0F8F', 5, 6);
insert into ficheros(fic_fecha, fic_nombre, fic_descripcion,
fic_binario, fic_url, tpf_id, cap_id) values ('
2014-07-30', 'Fichero7', 'Modelo 3D realizado con
fotogrametria', null, 'https://sketchfab.com/models/1
lo9mvX2JYxoVrI5QMDKLCi0F8F', 5, 7);
insert into ficheros(fic_fecha, fic_nombre, fic_descripcion,
fic_binario, fic_url, tpf_id, cap_id) values ('
2014-08-30', 'Fichero8', 'Modelo 3D realizado con
fotogrametria', null, 'https://sketchfab.com/models/1
lo9mvX2JYxoVrI5QMDKLCi0F8F', 5, 8);
insert into ficheros(fic_fecha, fic_nombre, fic_descripcion,
fic_binario, fic_url, tpf_id, cap_id) values ('
2014-09-30', 'Fichero9', 'Modelo 3D realizado con
fotogrametria', null, 'https://sketchfab.com/models/1
lo9mvX2JYxoVrI5QMDKLCi0F8F', 5, 9);

```

```

insert into ficheros(fic_fecha, fic_nombre, fic_descripcion,
    fic_binario, fic_url, tpf_id, cap_id) values ('
    2014-10-30', 'Fichero10', 'Modelo 3D realizado con
    fotogrametria', null, 'https://sketchfab.com/models/1
    lo9mvX2JYxoVrI5QMDKLCi0F8F', 5, 10);
insert into ficheros(fic_fecha, fic_nombre, fic_descripcion,
    fic_binario, fic_url, tpf_id, cap_id) values ('
    2014-11-30', 'Fichero11', 'Modelo 3D realizado con
    fotogrametria', null, 'https://sketchfab.com/models/1
    lo9mvX2JYxoVrI5QMDKLCi0F8F', 5, 11);
insert into ficheros(fic_fecha, fic_nombre, fic_descripcion,
    fic_binario, fic_url, tpf_id, cap_id) values ('
    2014-12-30', 'Fichero12', 'Modelo 3D realizado con
    fotogrametria', null, 'https://sketchfab.com/models/1
    lo9mvX2JYxoVrI5QMDKLCi0F8F', 5, 12);

insert into capiteles_bibliografias (cap_id, bib_id) values
    (1,1);
insert into capiteles_bibliografias (cap_id, bib_id) values
    (2,1);
insert into capiteles_bibliografias (cap_id, bib_id) values
    (3,1);

CREATE VIEW vistagis
AS SELECT      cap.cap_id, cap_datacion, cap_descripcion,
    cap_fotografia, cap_x, cap_y, cap_z,
    pro_publico, pro_cifnif, pro_nombreapellidos, pro_telefono,
    pro_email,
    mat_nombre,
    ord_tipo, ord_subtipo,
    tec_nombre,
    tal_nombre,
    fic_fecha, fic_nombre, fic_descripcion, fic_binario, fic_url
    ,
    tpf_3d, tpf_extension
FROM capiteles cap, propietarios pro, materiales mat,
    ordenes o, tecnicas tec, talleres tal, ficheros fic,
    tipos_ficheros tpf
where cap.pro_id = pro.pro_id
and cap.mat_id = mat.mat_id
and cap.tec_id = tec.tec_id
and cap.tal_id = tal.tal_id
and cap.ord_id = o.ord_id
and cap.cap_id = fic.fic_id
and fic.fic_id = tpf.tpf_id;

CREATE VIEW ficheros_vista
AS SELECT      cap.cap_id, fic_fecha, fic_nombre,
    fic_descripcion, fic_binario, fic_url,
    tpf_3D, tpf_extension
FROM capiteles cap,

```

```

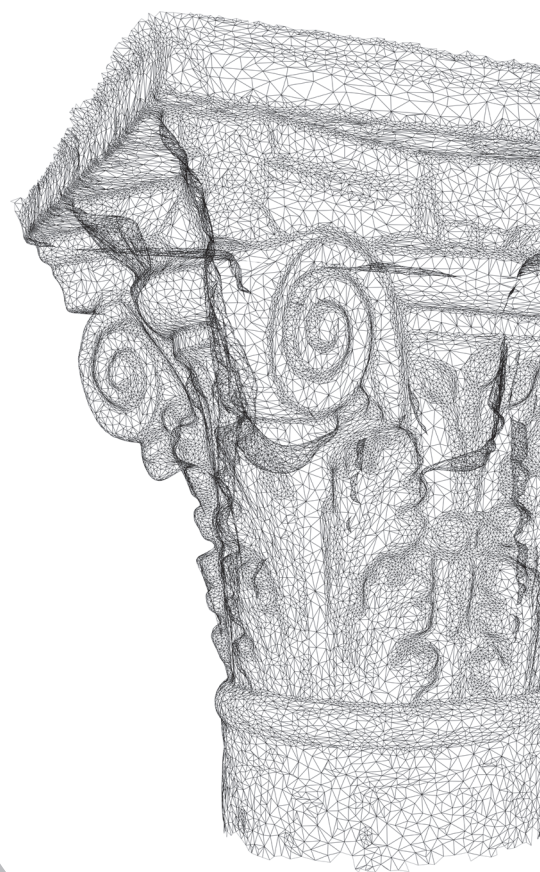
ficheros fic,
tipos_ficheros tpf
where cap.cap_id = fic.fic_id
and fic.fic_id = tpf.tpf_id;

CREATE VIEW intervenciones_vista
AS SELECT      cap.cap_id, int_fecha, int_motivo,
               int_descripcion
FROM capiteles cap,
intervenciones i
where cap.cap_id = i.int_id;

CREATE VIEW inspecciones_vista
AS SELECT      cap.cap_id, ins_fecha, ins_descripcion,
               ins_necesidadint
FROM capiteles cap,
inspecciones ins
where cap.cap_id = ins.ins_id;

```

Bibliografía



Bibliografía

- [1] M. A. 1919- Bunge, J. L. García Molina, and J. Sempere, *Teoría y realidad*, 1985th ed. Barcelona Ariel, 1981.
- [2] A. Almagro, "Veintidós años de experiencia de fotogrametría arquitectónica en la Escuela de Estudios Árabes, CSIC," *Minist. Cult.*, pp. 26–45, 2011.
- [3] J. A. Barrera Vera, R. Narváez, and J. Benavides, "Introducción a las aplicaciones de los escáner láser 3D a la construcción," *Actas de CONTART*, Valladolid, 2006.
- [4] J. L. Amaro Mellado, M. Aguilar Alejandre, and J. A. Barrera Vera, "Nuevas tecnologías y métodos tradicionales en el levantamiento del patrimonio arquitectónico.," *Libr. actas del XI Congr. Int. expresión gráfica Apl. a la Edif.*, vol. 1, pp. 575–582, 2012.
- [5] J. A. Barrera Vera, "Generation of virtual models of historical tapial walls in Seville (Spain)," in *Eleventh International Conference on Virtual System and Multimedia*, 2005.
- [6] J. A. Barrera Vera, "Aplicación de tecnologías innovadoras en la documentación geométrica del Patrimonio Arquitectónico y Arqueológico," Universidad de Sevilla, 2006.
- [7] J. M. Bermúdez Cano, "Escultura decorativa Tardorromana y Altomedieval en la Península Ibérica," *Romula*, vol. 6, pp. 289–293, 2007.
- [8] J. M. Bermúdez Cano, "Una propuesta metodológica para el estudio de los capiteles preislámicos," no. 8, pp. 133–158, 1997.
- [9] J. M. Bermúdez Cano, "La transmisión de modelos Protobizantinos y Orientales en los capiteles de hojas angulares Béticos," *Romula*, vol. 6, pp. 211–230, 2007.
- [10] J. M. Bermúdez Cano, "Los capiteles corintios normales de época emiral," *Romula*, vol. 7, pp. 249–270, 2008.
- [11] J. M. Bermúdez Cano, "Las técnicas de reparación mediante encastres en los talleres adriáneos de Itálica. Los capiteles," *Romula*, pp. 145–178, 2009.
- [12] C. Antonio Almagro, Gianni Carbonara, Stella Casiello, Dino Coppo, C. Cundari, Gaspare de Fiore, Mario Docci, Mario Fondelli, Tatiana Kirova, Emma Mandelli, Paola Rota Rossi Doria, and F. S. Robotti, Jean Paul Saint-Aubin, *Declaración sobre el levantamiento arquitectónico: Carta del Relievo*. 2000.
- [13] ICOMOS, *Principios para la Conservación y Restauración del Patrimonio Construido. The Cracow Charter*. 2000, pp. 1–6.
- [14] ICOMOS, *Carta Internacional sobre la Conservación y la Restauración de*

Monumentos y Sitios. The Venice Charter. 1964, p. 6.

- [15] P. Marinetto Sánchez, *Los capiteles del Palacio de los Leones en la Alhambra*. Granada: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Granada, 1996.
- [16] S. El-Hakim, J. A. Beraldin, M. Picard, and G. Godin, "Detailed 3D Reconstruction of Large-Scale Heritage Sites with Integrated Techniques," *EEE Journal Computer Graphics & Applications*, pp. 12–28, 2004.
- [17] P. Patias and M. Santana Quintero, "Introduction to Heritage Documentation," *ICOMOS ISPRS Comm. Doc. Cult. Herit.*, vol. XXXVIII, no. 1, pp. 9–13, 2009.
- [18] M. Santana Quintero, "Informacion al servicio del mantenimiento preventivo del patrimonio arquitectonico," Leuven, 2010.
- [19] F. Remondino and J. Böhm, "Theme Issue 'Terrestrial 3D modelling,'" *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 66, no. 1, p. 153, Jan. 2011.
- [20] S. Zlatanova, "Data collection and 3D reconstruction," 2009.
- [21] A. Martínez Rocamora, "Levantamiento del Archivo General de Indias por fotogrametría," Universidad de Sevilla, 2011.
- [22] ISPRS, "International Society for Photogrammetry and Remote Sensing." [Online]. Available: <http://www.isprs.org/>. [Accessed: 17-Mar-2014].
- [23] J. Angás Pajas, "Valorización, difusión y estandarización de la documentación geométrica del patrimonio," *Minist. Cult.*, pp. 154–163, 2011.
- [24] N. Yastikli, "Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning," *J. Cult. Herit.*, vol. 8, no. 4, pp. 423–427, Sep. 2007.
- [25] F. Fiorillo, B. J. Fernández-Palacios, F. Remondino, and S. Barba, "3d Surveying and modelling of the Archaeological Area of Paestum, Italy," *Virtual Archaeol. Rev.*, vol. 8, no. 4, pp. 55–60, 2013.
- [26] F. Remondino, "Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning," *Remote Sens.*, vol. 3, no. 6, pp. 1104–1138, May 2011.
- [27] F. Voltolini, S. El-Hakim, F. Remondino, S. Girardi, A. Rizzi, M. Pontin, and L. Gonzo, "Digital documentation of complex architectures by integration of multiple techniques: the case study of Valer Castle," *Electron. ...*, vol. 6491, pp. 1–8, 2007.
- [28] P. Arias, C. Ordóñez, H. Lorenzo, J. Herraiez, and J. Armesto, "Low-cost documentation of traditional agro-industrial buildings by close-range photogrammetry," *Build. Environ.*, vol. 42, no. 4, pp. 1817–1827, Apr. 2007.

- [29] A. Tordesillas, "Low-cost photogrammetric new tecnic by digital photography; applied to the S.A.V.E. of works by Chillida and Oteiza," in *IX International Forum of Studies "S.A.V.E. Heritage*, 2011.
- [30] A. Koutsoudis, B. Vidmar, F. Arnaoutoglou, and F. Remondino, "Case Studies for Testing the Digitisation Process Interim report," 2013.
- [31] J. De Reu, G. Plets, G. Verhoeven, P. De Smedt, M. Bats, B. Cherretté, W. De Maeyer, J. Deconynck, D. Herremans, P. Laloo, M. Van Meirvenne, and W. De Clercq, "Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage," *J. Archaeol. Sci.*, vol. 40, no. 2, pp. 1108–1121, Feb. 2013.
- [32] G. Pavlidis, A. Koutsoudis, F. Arnaoutoglou, V. Tsioukas, and C. Chamzas, "Methods for 3D digitization of Cultural Heritage," *J. Cult. Herit.*, vol. 8, no. 1, pp. 93–98, Jan. 2007.
- [33] J. A. Benavides López, J. A. Barrera Vera, and J. M. Martín Civantos, "Documentación gráfica del patrimonio: un paso adelante.," *Libr. actas del XI Congr. Int. expresión gráfica Apl. a la Edif.*, vol. 1, pp. 590–594, 2012.
- [34] J. A. Barrera Vera, D. Hernández Macias, and J. Herráez Boquera, "La muralla almohade de Sevilla: aplicación de tecnologías de vanguardia a los levantamientos en arqueología y restauración," *Aparejadores: boletín del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla*, no. 69. p. 48, 2005.
- [35] S. Al-kheder, Y. Al-shawabkeh, and N. Haala, "Developing a documentation system for desert palaces in Jordan using 3D laser scanning and digital photogrammetry," *J. Archaeol. Sci.*, vol. 36, no. 2, pp. 537–546, Feb. 2009.
- [36] F. Remondino and S. El-Hakim, "Image-based 3D modelling: a review," *Photogramm. Rec.*, vol. 21, no. 115, pp. 269–291, 2006.
- [37] B. Molero Alonso and J. A. Barrera Vera, "Escáner óptico 3D versus fotogrametría estereoscópica en la documentación gráfica de capiteles," Universidad de Sevilla, Sevilla, 2012.
- [38] RIEGL, "Terrestrial Scanning." [Online]. Available: <http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/>. [Accessed: 20-Mar-2014].
- [39] N. Shahram Mohammad, "Comparison of TOF, FMCW and phase-shift laser range-finding methods by simulation and measurement," *Quarterly J. Technol. Educ.*, vol. 1, no. 1, 2006.
- [40] J. I. San José Alonso, J. Martínez Rubio, J. J. Fernández Martín, and J. García Fernández, "Comparing Time-of-Flight and Phase-Shift. the Survey of the Royal

- Pantheon in the Basilica of San Isidoro (León),” *ISPRS - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. XXXVIII-5/, pp. 377–385, Sep. 2012.
- [41] R. Jiang, D. V. Jáuregui, and K. R. White, “Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: Literature review,” *Measurement*, vol. 41, no. 8, pp. 823–834, Oct. 2008.
 - [42] Snavely, “Bundler - Structure from Motion (SfM) for Unordered Image Collections.” [Online]. Available: <https://www.cs.cornell.edu/~snavely/bundler/>. [Accessed: 21-Mar-2014].
 - [43] C. WU, “VisualSFM: A Visual Structure from Motion System.” [Online]. Available: <http://ccwu.me/vsfm/>. [Accessed: 21-Mar-2014].
 - [44] 3D-Coform, “3D-Coform. Tools and Expertise for 3D Collection Formation.” [Online]. Available: <http://www.3dcoform.eu/>. [Accessed: 21-Mar-2014].
 - [45] Autodesk, “Autodesk 123D Catch 3D model from photos.” [Online]. Available: <http://www.123dapp.com/catch>. [Accessed: 21-Mar-2014].
 - [46] Insight3D, “Insight3D. Open-source image based 3d modeling software.” [Online]. Available: <http://insight3d.sourceforge.net/>. [Accessed: 21-Mar-2014].
 - [47] A. Bajard and O. Aubreton, “3D digitization of metallic specular surfaces using scanning from heating approach,” *Three-Dimensional Imaging, Interact. Meas.*, vol. 7864, pp. 1–7, 2011.
 - [48] S. Barba, F. Fiorillo, P. O. Coder, S. D. Auria, and E. De Feo, “An application for cultural heritage in erasmus placement. Surveys and 3D cataloguing archaeological finds in Mérida (Spain).,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. XXXVIII, no. March, pp. 2–4, 2011.
 - [49] Tca-Geomática and Junta de Andalucía. Consejería de Cultura, “Sistema de Información del Conjunto Arqueológico de Carmona,” 2010. [Online]. Available: <http://www.juntadeandalucia.es/culturaydeporte/museos/CAC/sicac/default.html>.
 - [50] J. M. Bermúdez Cano, “Capiteles Precalifales en el Palacio Múdejar del Rey Don Pedro: tipos, talleres y reemplazo,” *Romula*, vol. 3, pp. 257–284, 2004.
 - [51] Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico, “Recomendaciones Técnicas para la Documentación Geométrica de Entidades Patrimoniales,” 7, 2011.
 - [52] J. C. Llario Martínez, *PostGIS 2. Análisis Espacial Avanzado*. 2012.
 - [53] J. Herráez Boquera, J. L. Denia Ríos, E. M. García García, and P. Navarro

- Esteve, “Aplicaciones del Láser Scanner a la ingeniería civil.,” no. 1, p. 38, 2012.
- [54] J. L. Lerma García, *Fotogrametría moderna: analítica y digital*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2002.
- [55] K. B. Atkinson, *Close range photogrammetry and machine vision*, 1st ed. Caithness, UK: Whittles, 2009.
- [56] F. Remondino, El-Hakim, S. Girardi, A. Rizzi, S. Benedetti, and L. Gonzo, “3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures - The ‘3D-ARCH’ Project,” *NRC Publ. Arch. Arch. des Publ. du CNRC*, 2009.
- [57] A. Marín Fidalgo, *El Real Alcázar de Sevilla*. Guadalquivir Ediciones, 2005.
- [58] L. Rodríguez Temiño, D. González Acuña, J. I. Ruiz Cecilia, A. Jiménez Hernández, and J. M. López Sanchez, “SICAC: an information system for the Conjunto Arqueológico de Carmona (Carmona Archaeological Ensemble)(Seville, Spain),” *Archeol. e Calc.*, vol. 24, pp. 101–117, 2013.
- [59] Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos. E.T.S. Ingeniería Informática., “Bases de datos. Modelo Entidad/Interrelación (ERM de Chen),” 2005.
- [60] Universidad Pablo de Olavide, “www.upo.es.” [Online]. Available: <https://www.upo.es/arqueologia/romula/>.
- [61] J. M. Biosca Taronger, S. Navarro Tarín, and J. L. Lerma García, “Modelado tridimensional de una bóveda barroca mediante la combinación de láser escáner y de fotogrametría terrestre,” *jllerma.webs.upv.es*.
- [62] J. L. Lerma García, S. Navarro, M. Cabrelles, and V. Villaverde, “Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study,” *J. Archaeol. Sci.*, vol. 37, no. 3, pp. 499–507, Mar. 2010.
- [63] S. Barba and F. Fiorillo, “3D Modeling for documentation and monitoring of landslide risk: A Case Study,” *2012 12th Int. Conf. Comput. Sci. Its Appl.*, pp. 134–137, Jun. 2012.
- [64] S. Barba, F. Fiorillo, and E. De Feo, “3D-Antlers: Virtual reconstruction and three-dimesional measurement,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. XL-5/W1, W, no. February, pp. 15–20, 2013.
- [65] P. Clammer, “Erasing Isis: how 3D technology now lets us copy and rebuild entire cities,” *The Guardian*, 2016. [Online]. Available: <https://www.theguardian.com/cities/2016/may/27/isis-palmyra-3d-technology-copy-rebuild-city-venice-biennale>.

- [66] “Entrevistas con Dra.Oliva Rodríguez Gutiérrez, Dr.Miguel Angel Tabales Rodríguez, Dr.Daniel García Rivero y Dr.Francisco José García Fernández,” 2012.
- [67] A. Osello and F. Rinaudo, “Cultural Heritage Management Tools: The Role of GIS and BIM,” in *3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage*, 2016, p. 388.
- [68] E. Cabrera Revuelta, J. A. Barrera Vera, M. Caballero Sánchez, M. J. Chávez de Diego, and Y. Fernández Rodríguez, “Planificación de un levantamiento arquitectónico a través de un algoritmo genético,” in *Drawing, Building, Dreaming. Research on graphic expression applied to building*, 2016, pp. 85–95.
- [69] L. Sanjuán, D. Wheatley, P. Murrieta Flores, and J. Márquez Pérez, “Los SIG y el análisis espacial en arqueología: aplicaciones en la prehistoria reciente del sur de España,” *Arqueol. Náutica*, pp. 163–180, 2009.
- [70] C. Oubiña Parceró and C. Pérez González, “Los SIG y la gestión de la información arqueológica,” in *Simposio Internacional de Arqueología de Mérida: SIG y arqueología*, 2007.